

Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern, dargestellt am Beispiel von Sensoren mit Bayer Pattern Color Filter Array

**Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

von Herrn
Dipl.-Ing. Martin Correns
geboren am 22. April 1980 in Jena

Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß
Technische Universität Ilmenau

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Herr Dr.-Ing. Uwe Nehse
Mahr OKM GmbH

Tag der Disputation: 24.02.2011

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011000030

Abstract

In quality assurance the inspection of geometric features of objects is one the most common tasks. There is a great variety of measuring principles. One of these is the measurement by electro-optical sensors with corresponding image processing. Image processing, on the other hand, is used for many different tasks as well. Examples are object recognition, colour measurement, scene interpretation and many more. Measurement of geometric features is one of many applications, special optimizations are therefore rarely applied for this particular applications needs. In image processing in general, the development over the last years was towards colour images or even more than three channels, so called “multi channel images”. One of the results of the advanced popularity of colour image processing is, that today some types of three channel cameras are not more expensive than their single channel counterparts. Even though these cameras are being used in system for measurement of geometric features, the algorithms used do not take advantage of the additional channels information. There are a lot of special colour image processing algorithms existing today, but there are very little concepts that address the application of measurement of geometries.

In this thesis new approaches are being discussed to use the information delivered by colour image sensors in a way that the measurement of geometries in the image will be improved. Four different aspects of the chain of image processing will be addressed in this work. Two of them are applicable for all kinds of multi channel images and two are dedicated to special properties of the single most common colour image sensor type, the sensor with attached colour filter array (CFA) with an arrangement according to B. E. Bayer.

The two general multi channel approaches are:

- Extraction of object edge information by means of a new image filter where the information of all available channels is used
- High precision edge probing for those new filtered edge images with the aim of subpixel accurate edge position determination

The two CFA-Sensor related aspects are:

- A new “Demosaicing” algorithm to reconstruct the three channel image from the sensors raw data with special importance to geometrically correct edge reproduction
- Choice for object illumination source where the interaction of the emission spectra of the source and spectral sensitivity of the sensor is optimized to the needs of the designated application

The new approaches presented in this thesis deliver a contribution to image processing for measurement of geometric features with multi channel images, i.e. colour images. With them, better results, respectively lower measurement uncertainty, can be achieved. While they are applicable in their presented state, they do not stand as completed system. They are meant as a new way, a concept, to utilise multi channel image data to enhance current measuring machines. In addition these concepts open up prospects to further improvement.

Kurzfassung

Für die Qualitätssicherung gehört die Messung geometrischer Merkmale an Bauteilen zu den am häufigsten geforderten Aufgaben. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Messprinzipien dafür. Eines davon ist die Messung mittels bildauflösender optoelektronischer Sensoren und dazugehöriger Bildverarbeitung. Die Bildverarbeitung wird aber auch für viele andere Anwendungen genutzt. Es gibt sowohl Beispiele für maschinelles Sehen wie Objekterkennung oder Texturanalyse als auch Beispiele für die Verbesserung der Darstellung für den Menschen wie Optimierung auf bestimmte Ausgabegeräte oder Farbraumanpassungen. Die Bildverarbeitung wird relativ selten für die Messung geometrischer Größen angewendet, deshalb gibt es kaum spezialisierte Algorithmen, die auf die Anforderungen dieser Applikation zugeschnitten sind. Ein Trend der letzten Jahre in der Bildverarbeitung ist, dass verstärkt Farbkameras eingesetzt werden, wo früher nur Ein-Kanal-Kameras genutzt wurden. Einhergehend mit dieser Entwicklung ist der Preisverfall bei den Farbkameras. Es gibt inzwischen Farbkameras, die den gleichen Preis haben wie äquivalente Ein-Kanal-Kameras. Deshalb ist es üblich, auch für Aufgaben, in denen traditionell die Farbinformation nicht genutzt wird, Farbkameras einzusetzen, sei es nur, um dem Bediener ein angenehmeres Arbeiten zu ermöglichen. Obwohl auch bei Maschinen, die mittels Bildverarbeitung geometrische Größen messen sollen, Farb- bzw. Mehrkanalkameras genutzt werden, werden die Informationen der zusätzlichen Kanäle nicht für die Messaufgabe berücksichtigt.

In dieser Arbeit werden neue Ansätze vorgestellt, um die Zusatzinformation von Mehrkanalsensoren so zu nutzen, dass bessere Ergebnisse bei der Messung geometrischer Größen erzielt werden. Vier verschiedene Aspekte der Kette der Bildverarbeitung werden dabei betrachtet. Zwei davon gelten für Mehrkanalbildverarbeitung im Allgemeinen und zwei weitere widmen sich speziell dem verbreitetsten Farbkameratyp: Ein-Chip-Sensoren mit vorgeordnetem Farbfiltterraster (CFA) mit Bayer-Anordnung.

Die zwei allgemeinen Mehrkanal-Ansätze betreffen:

- Gewinnung von Objektkanten-Informationen mittels eines neuen Bildfilters, wobei alle Kanäle berücksichtigt werden.
- Kantenortsbestimmung mit Subpixelpräzision in diesen gefilterten Bildern.

Die zwei Ansätze, die sich speziell mit Sensoren mit CFA beschäftigen sind:

- Ein neues Verfahren zur Rekonstruktion des Farbbildes aus den Rohdaten des Sensors, sog. Demosaiking, mit vorteilhaften Eigenschaften für Geometriemessungen, d. h. ohne Verfälschung des Kantenortes.
- Auswahl von geeigneten Lichtquellen unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens der spektralen Emission der Quelle mit den spektralen Empfindlichkeiten des Sensors.

Die neuen Ansätze, die mit dieser Arbeit vorgestellt werden, liefern einen Beitrag zur Messung geometrischer Größen bei Systemen, in denen Farbkameras verbaut werden. Mit den untersuchten Verfahren können bessere Ergebnisse bzw. geringere Messunsicherheiten erreicht werden. In der vorgestellten Form und den beispielhaften Implementierungen sind sie anwendbar. Sie sind aber nicht als abgeschlossenes System zu betrachten. Vielmehr soll diese Arbeit einen neuen Weg aufzeigen, Mehrkanalinformationen für Geometriemessungen bei aktuellen Messmaschinen zu nutzen, und als Anregung für weiterführende Arbeiten dienen.

Thesen

1. Bei Geräten zur Messung geometrischer Größen, wie z. B. Koordinatenmessgeräten, werden teilweise Mehrkanalkameras eingesetzt. Die Informationen der zusätzlichen Kanäle werden aber nicht optimal für die Messung ausgenutzt.
2. Mit optimierten Bildverarbeitungsalgorithmen für die Messung geometrischer Größen können bessere Messergebnisse bei Geräten mit Mehrkanalkameras erreicht werden, ohne dass höhere Hardware-Kosten entstehen.
3. Der am weitesten verbreitete Mehrkanalkameratyp ist die Ein-Chip-Kamera mit Farbfilterraster nach Bayer-Anordnung (CFA-Kamera).
4. Die Kanaltrennung bei CFA-Kameras kann verbessert werden, wenn eine Beleuchtung mit spektraler Emission gewählt wird, die gut zur Filterwirkung des Filterrasters passt.
5. Die Eigenschaften des Dreikanalbildes, welches aus Rohdaten der CFA-Kamera erzeugt wird (Demosaiking), können für die Messung geometrischer Größen verbessert werden, wenn ein angepasstes Demosaikingverfahren für diesen Zweck angewendet wird.
6. Ein geeigneter Ansatz für ein angepasstes Demosaiking ist, nur Änderungen durch den Rekonstruktionsprozess zuzulassen, die auch eine abbildende Optik auf ein Bild ausüben würde.
7. Die Nutzung nur eines Kanals eines Dreikanalsystems birgt die Gefahr, Informationen zu vernachlässigen, die für die Kantenortsbestimmung wichtig sind. Eine Transformation von einem trichromatischen System in ein anderes (z. B. RGB zu HSI) bringt nur dann einen Vorteil, wenn A-priori-Wissen über die Kante vorhanden ist.
8. Um die Mehrkanaldaten besser ausnutzen zu können, ist ein Verfahren nötig, bei dem die Kanteninformation kanalübergreifend ausgewertet wird.
9. Ein Filter basierend auf vektoriellen Differenzen benachbarter Pixel ist geeignet, um kanalübergreifend Kanteninformationen zu gewinnen. Diese Information kann in einem Grauwert-Kantenbild gespeichert werden.
10. In einem Grauwert-Kantenbild liegt der Kantenort beim maximalen Grauwert eines „Lichtbandes“, das die ursprüngliche Kante repräsentiert.

11. Etablierte Verfahren für subpixelgenaue Kantenortsbestimmung im ungefilterten Bild sind nicht geeignet, um den Kantenort auf dem „Lichtband“ im gefilterten Grauwert-Kantenbild zu bestimmen.
12. Eine Approximation des Grauwertverlaufs des „Lichtbandes“ mittels einer Gauß-Funktion ist gut geeignet, um den Kantenort präzise zu bestimmen.
13. Ein Mehrkanalbildverarbeitungssystem bestehend aus einer CFA-Kamera, dem CHA-Demosaiking, dem Differenzvektor-Filter und der Kantenortsbestimmung mittels Gauß-Funktion kann bei präzisen Durchlichtstrukturen gleich gute Messunsicherheiten erreichen wie ein vergleichbares Einkanalssystem.
14. Ein Mehrkanalbildverarbeitungssystem bestehend aus einer CFA-Kamera, dem CHA-Demosaiking, dem Differenzvektor-Filter und der Kantenortsbestimmung mittels Gauß-Funktion kann Messungen an farbigen Objekten durchführen, bei denen ein vergleichbares Einkanalssystem unter Umständen scheitert.
15. Ein Mehrkanalbildverarbeitungssystem bestehend aus einer CFA-Kamera, dem CHA-Demosaiking, dem Differenzvektor-Filter und der Kantenortsbestimmung mittels Gauß-Funktion ist einem Mehrkanalsystem bestehend aus einer vergleichbaren CFA-Kamera mit Bildverarbeitungsverfahren für nur einen Kanal überlegen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	ii
Kurzfassung	iii
Thesen	v
Vorwort	1
1 Einleitung	3
2 Stand der Technik zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern	7
2.1 Begriffsbestimmung und Aufnahme von Mehrkanalbildern	7
2.1.1 Modelle digitaler Mehrkanalbilder	8
2.1.2 Aufnahmekanal für digitale Mehrkanalbilder	9
2.1.3 Unterschiede der Hardware zwischen Einkanal- und Mehrkanal-Bildverarbeitung	12
2.1.4 Einflüsse auf die Messunsicherheit bei Geometriemessungen mittels Bildverarbeitung	13
2.1.5 Abbildung der Objektszene	13
2.1.6 Abtastung der Abbildung	15
2.1.7 Beleuchtung der Objektszene	17
2.1.8 Aufnahmekanal für Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array	20
2.2 Kantenortsbestimmung in digitalen Bildern	23
2.2.1 Pixelgenaue Kantenortssuche	24
2.2.2 Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung	26
2.2.3 Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern	28
2.2.4 Bedeutung der Kantenortsbestimmung für die Präzisionsmessung geometrischer Größen	29
2.2.5 Zusammenfassung des Standes der Technik und Präzisierung der Aufgabenstellung	31

3	Theoretische Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern	33
3.1	Informationen in digitalen Bildern	33
3.1.1	Informationsgehalt in digitalen Bildern	34
3.1.2	Informationsgehalt in digitalen Ein-Kanal-Bildern	35
3.1.3	Informationsgehalt in digitalen Mehrkanalbildern	35
3.1.4	Informationsgehalt in digitalen Bildern von CFA-Sensoren	36
3.1.5	Zusammenfassung zu Informationen in digitalen Bildern	37
3.2	Theoretische Untersuchungen zum Einfluss der Beleuchtung auf die Bilderzeugung von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array	37
3.3	Theoretische Untersuchungen zur Rekonstruktion des Mehrkanalbildes aus Rohdaten von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array	40
3.4	Der Differenzvektor-Kantenfilter	46
3.5	Kantenortsbestimmung für Differenzvektor-Kantenbilder	52
3.5.1	Approximation mit Polynom vierten Grades	54
3.5.2	Interpolation mit natürlichen kubischen Splines	55
3.5.3	Approximation mit Gaußfunktion	57
3.5.4	Näherungsverfahren für die Approximation	58
3.5.5	Numerische Bestimmung des Maximums	59
4	Experimentelle Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern	61
4.1	Hard- und Software für experimentelle subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in Mehrkanalbildern	61
4.1.1	Hardware für experimentelle subpixelgenaue Kantenortsbestimmung	61
4.1.2	Synthetische Bilder für die experimentelle subpixelgenaue Kantenortsbestimmung	63
4.1.3	Grundlage für Implementierungsarbeiten mit der Softwarebibliothek QID	64
4.2	Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Beleuchtung auf die Bilderzeugung von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array	66
4.2.1	Breitbandlichtquelle in Kombination mit Breitband-Metallschicht-Interferenzfiltern	66
4.2.2	Breitbandlichtquelle in Kombination mit Schmalband-Metallschicht-Interferenzfiltern	70
4.2.3	Anorganische RGB-Leuchtdioden in einem Gehäuse	72
4.2.4	Anorganische RGB-Leuchtdioden in getrennten Gehäusen	74
4.2.5	Zusammenfassung zum Einfluss der Beleuchtung auf die Bilderzeugung von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array	76

4.3	Experimentelle Untersuchungen zur Rekonstruktion des Mehrkanalbildes aus Rohdaten von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Arrays	77
4.3.1	Implementierung des neuen CHA Demosaikings	77
4.3.2	Übersicht zu den experimentellen Untersuchungen des CHA Demosaikings	81
4.3.3	Visuelle Beurteilung der Ergebnisse verschiedener Verfahren	81
4.3.4	Vergleich der Messung geometrischer Größen in rekonstruierten Bildern	84
4.3.5	Subpixelgenaue Kantenposition in rekonstruierten synthetischen Bildern	85
4.3.6	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zum CHA Demosaiking-Verfahren	87
4.4	Experimentelle Untersuchungen zum Differenzvektor-Kantenfilter in Mehrkanalbilddaten	88
4.4.1	Implementierung	88
4.4.2	Kantenfilterung bei harten Schwarz-Weiß-Kanten	90
4.4.3	Kantenfilterung für synthetische RGB-Kanten	92
4.4.4	Untersuchungen des Differenzvektor-Kantenfilters an realen Mehrkanalbildern	94
4.4.5	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zum Differenzvektor-Kantenfilter	97
4.5	Experimentelle Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Vektordifferenz-Kantenbildern	97
4.5.1	Implementierung des neuen Verfahrens zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Vektordifferenz-Kantenbildern	98
4.5.2	Übersicht zu den Experimenten für das neue Verfahren zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Differenzvektor-Kantenbildern	102
4.5.3	Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in synthetischen Vektordifferenz-Kantenbildern	103
4.5.4	Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in realen Vektordifferenz-Kantenbildern	108
4.5.5	Direkter Vergleich von Ein-Kanal- mit CFA-Kamera	115
4.5.6	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zur Kantenortsbestimmung in Differenzvektor-Kantenbildern	118
5	Zusammenfassung und Ausblick	121
5.1	Zusammenfassung	121
5.2	Ausblick	125
	Abkürzungen	133

Abbildungsverzeichnis

1.1	Koordinaten-Messung mit optischem Sensor	5
2.1	Arten digitaler Bilder	8
2.2	Filterrad-Kamera	10
2.3	Parallaxes Mehrkanal-Kamerasystem	10
2.4	Mehrkanalsystem mit Strahlteiler (Drei-Chip)	11
2.5	Prinzipskizze eines Pixels des X3-Sensors	11
2.6	Sensor mit Filterarray	12
2.7	Komponenten eines KMG mit optischem Sensor	13
2.8	Farbquerfehler	14
2.9	Farblängsfehler	14
2.10	Spektrale Sensitivität eines Sensors (Sony ICX424AQ)	17
2.11	Kombinationen von Beleuchtungsparametern	18
2.12	Filteranordnung nach Bayer	20
2.13	Einzelkanäle eines CFA-Sensors	22
2.14	Suchstrahlbasierte Kantenortsbestimmung	23
2.15	Blockstruktur von Subpixelverfahren	28
3.1	Spektrale Empfindlichkeit – Beispiel: Sony ICX285AQ	38
3.2	Filteranordnung nach Bayer	41
3.3	Demosaiking: Nearest Neighbour	41
3.4	Demosaiking: Bilineare Interpolation	42
3.5	Pixelnachbarschaft des Verfahrens (Maske)	43
3.6	Graph einer radialsymmetrischen 2D-Gauß-Funktion	45
3.7	Betrag des Differenzvektors zweier Pixel	48
3.8	Differenzvektoren aus einer 2x2-Pixelnachbarschaft	48
3.9	Theoretisches und praktisches Verhalten des Filters	50
3.10	Datenfluss Differenzvektor-Kantenfilter	51
3.11	Alternativer Datenfluss Differenzvektor-Kantenfilter	52
3.12	Simulation einer Approximation mit einem Polynom vierten Grades	54
3.13	Graphische Darstellung von Polynomen und deren Ableitungen	55
3.14	Spline zwischen zwei Stützpunkten	56
3.15	Gaußfunktion	58
3.16	Newtonsches Näherungsverfahren	60
4.1	RGB-LED-Beleuchtungen	62

4.2	Auflicht-Messobjekte	63
4.3	Durchlicht-Messobjekte	63
4.4	QID Klassenübersicht und Modulorganisation (Auswahl)	65
4.5	Spektrale Transmissionsgrade Breitbandfilter (Herstellerangabe) . .	67
4.6	Relative spektrale Transmission der Breitbandfilter (gemessen) . .	68
4.7	Spektren schmaler Bandpassfilter (gemessen)	70
4.8	Spektren 3-Chip-RGB-LED	72
4.9	Spektren getrennter RGB-LEDs	74
4.10	Beispielrechnung zum CHA Demosaiking	78
4.11	Verteilung der Zeiger bei Berechnungen der grünen Pixel	79
4.12	Ablaufplan CHA Demosaiking für den grünen Kanal	80
4.13	Schematische Darstellung der Versuche zum CHA Demosaiking- Verfahren	81
4.14	Schematische Darstellung des „Reißverschluss“-Effekts	82
4.15	Subjektiver Vergleich der Rekonstruktion aus CFA-Rohdaten mittels verschiedener Verfahren	83
4.16	Darstellung der gemessenen Geometrien und deren Messfelder . . .	84
4.17	Kantenpositionsabweichung durch unterschiedliche Demosaiking Verfahren	86
4.18	Datenfluss des Differenzvektor-Kantenfilters	88
4.19	Einfache Musterkante Nr. 1 und passendes Filterbild	90
4.20	Einfache Musterkante Nr. 2 und passendes Filterbild	91
4.21	Synthetisches Bild VK und mittels Differenzvektor gefiltertes Bild .	92
4.22	Grauwertverläufe des Originalbildes VK und des Kantenbildes . . .	93
4.23	Diskrete Grauwerte von Original und gefiltertem Bild: Vertikale Kante	93
4.24	Ausschnitt eines synthetischen Bildes: Schräge Kante	94
4.25	Ausschnitt eines gefilterten synthetischen Bildes: Schräge Kante . .	94
4.26	Messobjekte für Durch- und Auflicht	95
4.27	Ablaufplan der pixelgenauen Kantensuche	99
4.28	Arbeitsschritte bei der Kantenortsbestimmung	103
4.29	Synthetische Bilder in verschiedenen Drehlagen	103
4.30	Schematische Darstellung der Lage der Suchstrahlen	103
4.31	Ermittelte Kantenorte in synthetischen Bildern, Kante unter ver- schiedenen Winkeln im Bild	104
4.31	Ermittelte Kantenorte in synthetischen Bildern, Kante unter ver- schiedenen Winkeln im Bild (Fortsetzung)	106
4.31	Ermittelte Kantenorte in synthetischen Bildern, Kante unter ver- schiedenen Winkeln im Bild (Fortsetzung)	107
4.32	Ergebnisse der Suchstrahlverschiebung, Kantenwinkel 0°	108
4.33	Vorgehensweise bei den Messungen	109
4.34	Ergebnisse von Messungen in reellen Kamerabildern, Messobjekt: Negativ	110
4.34	Ergebnisse von Messungen in reellen Kamerabildern, Messobjekt: Negativ (Fortsetzung)	111

4.35	Defekt in der gemessenen Kante	112
4.36	Ergebnisse von Messungen in reellen Kamerabildern, Messobjekt: Positiv	112
4.36	Ergebnisse von Messungen in reellen Kamerabildern, Messobjekt: Positiv (Fortsetzung)	113
4.37	Schematische Darstellung der Vergleichsmessung von Ein-Kanal- und Drei-Kanal-System	115
4.38	Vergleich panchromatische Kamera und CFA-Kamera – Mittelwerte über 100 Bilder	117
4.39	Vergleich panchromatische Kamera und CFA-Kamera – Standardab- weichungen über 100 Bilder gemittelt über 100 Suchstrahlen	117

Tabellenverzeichnis

2.1	Arten digitaler Bilder	9
2.2	Beispiele für Beleuchtungskonfigurationen	19
2.3	Übersicht der grundlegenden Kantenortskriterien	27
2.4	Kanäle des Farbbildes im HSI-Farbsystem	30
3.1	Ordnung für Lichtquellen	40
3.2	Gewichte für das neue Verfahren	45
3.3	Eigenschaften des Kantenabbilds und resultierende Kantenortskriterien	52
3.4	Eigenschaften des gefilterten Kantenabbildes und resultierende Kantenortskriterien	53
4.1	Histogramme der Einzelkanäle bei Breitbandfiltern	69
4.2	Histogramme der Einzelkanäle bei schmalbandiger Beleuchtung	71
4.3	Histogramme der Einzelkanäle bei 3-Chip-LED-Beleuchtung	73
4.4	Histogramme der Einzelkanäle bei RGB-LED-Beleuchtung mit separaten LEDs	75
4.5	Getestete Leuchten mit ihren Vor- und Nachteilen	76
4.6	Messwerte zu Messungen in rekonstruierten Bildern	85
4.7	Ergebnisse Kreismessung bei gefilterten Bildern	96
4.8	Festlegung der Stützpunktzahl	100

Vorwort

Photoelektrische Sensoren gehören meiner Meinung nach zu den wichtigsten technischen Errungenschaften des 20. Jahrhunderts. Nicht nur für maschinelle Anwendungen, sondern besonders für Bereiche des täglichen Lebens haben sie sehr viel verändert. Aus Unterhaltungs- und Kommunikationsmedien sind bewegte und unbewegte digitale Bilder nicht wegzudenken. Die Ansicht, die Verdrängung der chemischen Fotografie sei ein großer Verlust, teile ich nicht. Ich empfinde die Fortschritte und Möglichkeiten, die sich mit modernen Sensoren ergeben, als faszinierend. Die hohe Empfindlichkeit, Geschwindigkeit und Auflösung ermöglichen Bilder, die zuvor unmöglich waren. Der Stand der Technik bei Fotografie wurde innerhalb weniger Jahre völlig neu geschrieben. Die digitale Verarbeitung der Daten trägt einen sehr großen Anteil zu diesem Fortschritt bei. Da ich selbst auch fotografiere und mich mit dieser Art von Technologie identifizieren kann ist die vorliegende Arbeit für mich mehr, als die bloße Lösung eines technischen Problems.

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Qualitätssicherung an der Technischen Universität Ilmenau entstanden. Ich bin sehr dankbar dafür, diese Chance erhalten zu haben. Neben meinen Aufgaben bei der Mitarbeit an verschiedenen Projekten hat mir Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß die Freiheit gelassen, dieses Thema weiterzuverfolgen. Er hat mich jederzeit wissenschaftlich beraten und wertvolle Anregungen gegeben. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern des Fachgebietes Qualitätssicherung. Viele haben mir auf ihren jeweiligen Spezialgebieten unentbehrliche Hilfestellungen geleistet. Mit allen habe ich fruchtbare Gespräche zu meiner Arbeit geführt. Des Weiteren möchte ich Dr. Diego Scheide danken, der mich bei mathematischen Fragen zu dem neuen Filter beraten hat.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern. Ihre Vorbildfunktion und ihre Unterstützung während meiner Ausbildung waren der Grundstein zu dieser Arbeit.

1 Einleitung

Das künstliche Sehen (Machine Vision) gehört zu wichtigsten Technologien des 21. Jahrhunderts. Die Anfänge der *Bildverarbeitung* liegen mehr als 70 Jahre zurück. Da die Verbesserung der Hardware zur Aufnahme und zur Verarbeitung direkt abhängig von den Fortschritten der Halbleitertechnik ist, hat sich die digitale Bildverarbeitung seit mehr als 40 Jahren rasant entwickelt. In den zehn Jahren von 1998 bis 2008 hat sich laut dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) der Umsatz der Unternehmen der industriellen Bildverarbeitung in Deutschland verdreifacht[VDM09].

Mit dem technologischen Fortschritt erweitert sich das Anwendungsspektrum ständig. Bildverarbeitung wird auf vielen verschiedenen Gebieten eingesetzt: Qualitätssicherung, Prozesskontrolle, Medizin, Lebensmittelanalyse, Straßenverkehr und viele andere. Abhängig vom Einsatz werden unterschiedliche Anforderungen an örtliche Auflösung, spektrale Auflösung, Dynamikumfang, Empfindlichkeit, Bildfrequenz oder Bildgröße gestellt. Es ist der Trend zu erkennen, alle genannten Parameter weiter zu steigern bzw. zu verfeinern. Die Anwendung von Bildverarbeitungstechniken ist nicht auf klassische (durch Licht erzeugte) Bilder beschränkt. Immer häufiger werden sie auch auf andere bildgebende Verfahren angewandt wie z. B.: Tomographen, Terahertzbilder, scannende Verfahren [BT09, Lee08].

Bildverarbeitung wird meist nicht als alleinstehende Disziplin betrachtet. An vielen Lehr- und Forschungseinrichtungen ordnet sie sich jeweils den Forschungsfeldern, in denen sie eingesetzt wird, unter. Die Probleme, die gelöst werden sollen, sind zum Teil so unterschiedlich, dass eine universelle Bildverarbeitung nicht sinnvoll eingesetzt werden kann. Wenn Arbeiten zum Thema Bildverarbeitung Problemstellungen zu lösen versuchen, ohne den zugrunde liegenden Anlass, die Aufgabenstellung, ausreichend zu berücksichtigen, bleibt das Ergebnis unter Umständen hinter den möglichen erreichbaren Zielen zurück. Trotzdem wird die Position, Bildverarbeitung sei von ihren Hardwaregrundlagen unabhängig, in Fachbüchern vertreten: „Der eigentliche Prozess der Entstehung von Bildern ist oft kompliziert und meist für die Bildverarbeitung auch unwesentlich.“[BB06]. Aus Sicht der Ingenieurwissenschaften, besonders beim Einsatz in Mess- und Prüftechnik, sollten die Eigenschaften der Hardware nicht außer Acht gelassen werden. Folgendes Beispiel soll diese Aussage veranschaulichen:

Wenn ein neues Verfahren zur Farbtexturanalyse entwickelt wird, das auf Ähnlichkeiten direkt benachbarter Pixel basiert, aber nicht berücksichtigt, mit welcher Kamera die zu analysierenden Bilder später aufgenommen werden, so wird in der Praxis das Verfahren unter bestimmten Bedingungen völlig versagen. Für eine Farbtextur ist es wichtig, wie die Abbildung auf dem Sensor erscheint (Farbfehler, Auflösung) und wie diese Abbildung vom Sensor abgetastet wird (Rastermaß, Pixelform, Rasterverschiebungen zwischen den Farben). Die Erscheinung der Textur im digitalen Bild kann sich, abhängig vom verwendeten Kamerasystem, sehr stark unterscheiden.

Untersuchungen zu Bildverarbeitungsverfahren in der vorliegenden Arbeit zielen auf die Anwendung der Messung geometrischer Größen ab. Deshalb werden die Eigenschaften der bilderzeugenden Hardware in Bezug auf Abweichungen bei der Erfassung von Geometrien berücksichtigt.

Die *präzise Messung geometrischer Größen* wird hauptsächlich in der Fertigungsmesstechnik eingesetzt, sie ist notwendig für die Qualitätssicherung und damit integraler Bestandteil moderner Produktion. Sehr universelle und deshalb besonders wichtige Messmaschinen sind Koordinatenmessgeräte (KMGs). Ihre Arbeitsweise beruht auf der Erfassung von Objektpunkten und deren Verrechnung zu Geometrien [PP02, Pfe92].

Die Verrechnung der Punkte zu Geometrien und deren Auswertung lässt die Frage nach Erfassung dieser Objektpunkte völlig offen. Viele Koordinatenmessgeräte arbeiteten früher ausschließlich taktil, die Messung beruhte also auf einer mechanischen Kopplung zwischen Messgerät und Messobjekt. Da KMGs vornehmlich in der Fertigungsmesstechnik eingesetzt werden und viele der Bauteile aus metallischen Werkstoffen bestehen, wurde das Werkstück durch die Messung/Prüfung kaum beeinträchtigt. Maschinen mit vorwiegend taktiler Messung sind auch heute noch weit verbreitet [Neu05]. Mit zunehmender Vielfalt an Werkstoffen und Bauteilgeometrien gibt es jedoch immer mehr Messsituationen, bei denen die taktile Messung nicht optimal ist.

Der Einsatz von taktilen Sensoren hat Nachteile und Grenzen, wie Kräfte auf das Messobjekt, unzugängliche Orte, Beschränkung durch Tastkopfgröße. Deshalb ist ein Trend bei KMGs Multisensortechnik anzuwenden. Neben den taktilen werden verschiedene andere berührungslose Sensoren eingesetzt. Für die Messaufgabe wird das passende Sensorprinzip ausgewählt, um die Vorteile der verschiedenen möglichen Messverfahren optimal auszunutzen.

Einige Gerätebeispiele sind:

- Werth Video-Check HA 400 [Wer09a]
- Zeiss O-INSPECT [Zei09]

- Mahr OKM UNI VIS 250 [OKM09]
- OGP Smartscope Vantage 650 [OGP09a]
- Mitutoyo Quick Vision Hybrid [Mit09b]

Erst durch moderne Rechentechnik und Halbleitertechnologien ist der wirtschaftliche Einsatz berührungsloser Sensoren interessant geworden. In den letzten Jahrzehnten gab es große Fortschritte bei Geschwindigkeit und Auflösung. Eine besonders wichtige Technologie für berührungsloses Messen ist die optische Sensorik mit Bildverarbeitung. Dabei wird über ein optisches System (Objektiv) eine Abbildung der Objektszene auf einem photoelektrischen Empfänger (Kamera) erzeugt. Die Daten des Empfängers werden mit entsprechender Rechentechnik verarbeitet. Punktkoordinaten des Objektes sind das Ergebnis.

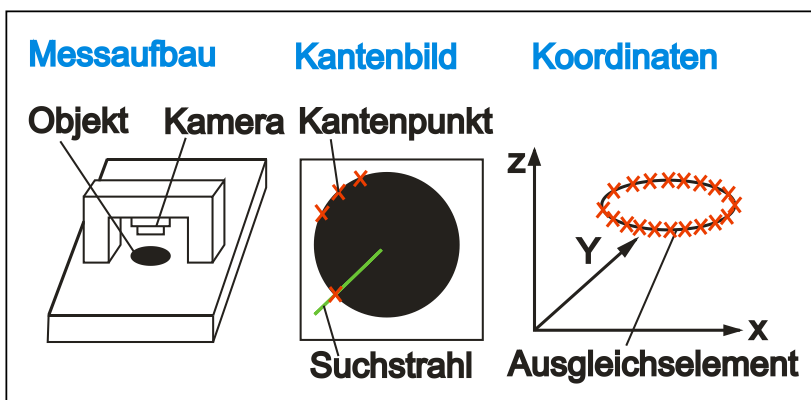


Abbildung 1.1: Koordinaten-Messung mit optischem Sensor

Die Hauptvorteile der bildauflösenden optischen Sensoren mit Bildverarbeitung sind, dass es keine praxisrelevante Beeinflussung des Objekts durch das Messverfahren gibt und dass sehr viele Informationen über das Objekt zeitgleich erfasst werden können. Licht ist die Kopplung zwischen Messobjekt und Maßstab. Die zusätzliche eingebrachte Strahlungsleistung ist der einzige Einfluss auf das Messobjekt und das auch nur dann, wenn aktiv beleuchtet wird. Durch den bildauflösenden Matrixempfänger wird die gesamte Messszene praktisch zeitgleich abgetastet. Damit können unterschiedliche geometrische Merkmale des Objektes in sehr kurzer Zeit gemessen werden.

Für die Messung geometrischer Größen werden teilweise bereits Mehrkanalkamerasysteme benutzt, aber es ist nur bekannt, dass die Auswertung mit einem Kanal erfolgt.

Es gibt mehrere Gründe, warum es sinnvoll ist Farb- bzw. Mehrkanalinformationen für Geometriemessungen zu nutzen. Ein Grund ist der Betrieb von Bildverarbeitungssystemen, bei denen aus anderem Anlass als der Geometriemessung ein

Mehrkanal-Kamerasystem eingesetzt wird und bei denen die Geometriemessung mit zu den Aufgaben gehört. Beispielsweise ist es denkbar, dass der Nutzer einer Maschine ein farbiges Live-Bild benötigt, um visuelle Inspektionen durchzuführen, oder dass verschiedene Merkmale eines Objektes wie Farbton und Textur gemessen werden sollen. Falls die Geometriemessung auch zu den Aufgaben gehört, sollten alle verfügbaren Informationen dafür genutzt werden können.

Der zweite Grund ist, dass die Aufgabe vorsieht, die Geometrie von Objekten zu messen, deren Objektkanten in einfachen Grauwertbildern nicht mit ausreichender Sicherheit zu detektieren sind. Das kann zum Beispiel daran liegen, dass bei der vorhandenen Beleuchtung kein ausreichender Kontrast zur Umgebung erzeugt wird, wenn nur dieser eine Kanal betrachtet wird. Die Nutzung aller Kanäle garantiert noch nicht, dass der Kontrast ausreichend sein wird, aber sie erhöht die Chancen.

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag dazu, die Informationen, die aktuelle Kamerasensoren zur Verfügung stellen, optimal für Messung geometrischer Größen zu nutzen. Die Ansätze sind dabei nicht auf Farbbildverarbeitung beschränkt, sondern sollen für Mehrkanalbilder im Allgemeinen anwendbar sein. Von Interesse ist in erster Linie der für den Menschen sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums (VIS) sowie die angrenzenden Bereiche nahes Infrarot (NIR) und Ultraviolett (UV) [Hen02]. Kameras mit Farbfilterraster und einer Filteranordnung nach Bayer [Bay75] sind die nach Stückzahl am weitesten verbreiteten Farbkameras. Es wird deshalb besonders auf diesen Kamerateyp zur Abtastung des Bildes eingegangen. Das besondere ist, dass diese Kameras drei Kanäle mit nur einem einzelnen Matrixsensor und einem speziellen vorgesetzten Color Filter Array (CFA) erfassen können.

Die subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern wird theoretisch und experimentell untersucht und bewertet. Spezielle Untersuchungen betreffen die verbreitetsten Dreikanal-Kameras, die Kameras mit vorgesetztem Farbfilterraster (CFA) mit Bayer-Anordnung.

2 Stand der Technik zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern

2.1 Begriffsbestimmung und Aufnahme von Mehrkanalbildern

Zur Bildverarbeitung gehören die Bildaufnahme, die Verarbeitung und Datenreduktion, die Darstellung und Interpretation sowie eine daraus folgende Aktion[Ern91]. Das Bild stellt dabei eine flächenhafte Verteilung der Bestrahlungsstärke in einer Ebene dar [Jae09].

Wenn heute von Bildverarbeitung gesprochen wird, ist damit fast immer die digitale Bildverarbeitung gemeint, also numerische Berechnungen mit diskreten Werten für Bilder, die auf festen Rastern basieren. Die Elemente der Raster werden als Pixel bezeichnet. Die klassische digitale Bildverarbeitung hält sich an eben diese Raster. Operationen wie Filtern oder Segmentieren werden Pixel für Pixel ausgeführt. Das Ergebnis ist wieder eine Matrix von Pixeln.

Mehrkanalbildverarbeitung ist ganz allgemein digitale Bildverarbeitung für Bilder, die mehr als einen Kanal haben. Die Bedeutung dieser Kanäle und die Darstellung können unterschiedlich sein.

Die Gemeinsamkeit unterschiedlicher Kanäle ist in der Regel ihre Perspektive. Sie repräsentieren ein Abbild eines bestimmten Objektes oder einer Objektszene. Die verschiedenen Kanäle können zum Beispiel unterschiedliche Wellenlängen des Lichts, unterschiedliche Zeitpunkte oder unterschiedliche Fokusebenen repräsentieren.

Für die Darstellung kommen verschiedene Modelle in Frage. Eine Möglichkeit besteht darin, jeden Pixel als Vektor zu betrachten. Jeder Wert in einem der Kanäle eines bestimmten Pixels entspricht dann den Komponenten des Vektors. Das gesamte Bild ist ein diskretes Vektorfeld mit festem Raster.

Eine andere Darstellungsform ist die als Bildstapel. Jeder Kanal wird als eigenständiges Bild aufgefasst. Die Bilder aller Kanäle bilden einen Stapel von zweidimensionalen Bildern.

Die Darstellung hängt maßgeblich davon ab, wie die Daten weiterverarbeitet werden sollen.

2.1.1 Modelle digitaler Mehrkanalbilder

Hier sollen wesentliche Definitionen zur Klassifizierung von digitalen Bildern erfolgen, von Bildern, die Spektren des Lichtes, also elektromagnetische Strahlung, repräsentieren. Photoelektrische Sensoren können Wellenlängen nicht differenzieren. Sie liefern ihr Signal basierend auf dem inneren photoelektrischen Effekt [Thu09]. Es müssen zusätzlich Mechanismen geschaffen werden, um „Farben“ zu unterscheiden. Das geschieht kanalweise. Erläuterungen zu Bilderfassungsverfahren finden sich in Unterabschnitt 2.1.2.

Die Klassifizierung von Ein-Kanal-Bildern (oder Grauwertbildern) hängt direkt von den Eigenschaften des bildgebenden Verfahrens ab, mit dem sie erzeugt wurden. Für Bilder, die einer Intensitätsfunktionen des Lichtes entsprechen, gibt es eine einfache Unterscheidung in monochromatische und panchromatische Bilder.

- „Panchromatisch“ bedeutet „all-farbig“. Gemeint sind damit Bilder von Sensoren, die über ein sehr weites Spektrum empfindlich sind bzw. das gesamte für den Menschen sichtbare Spektrum VIS empfangen können (über alle Farben).
- „Monochromatisch“ bedeutet „einfarbig“. Gemeint sind Bilder, die einen schmalen Spektralbereich repräsentieren. Wie dies technisch realisiert wird, ist nicht relevant. Es kann z. B. ein panchromatischer Sensor mit vorgesetztem Filter sein, eine einfarbig beleuchtete Szene oder der Einzelkanal eines Mehrkanalbildes.

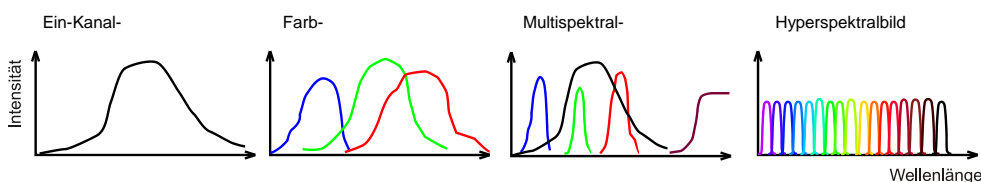


Abbildung 2.1: Arten digitaler Bilder

Die Einordnung der Mehrkanalbilder richtet sich nach der Anzahl und der Bedeutung der Kanäle. Es gibt keine allgemeingültige Definition für die Klassifizierung digitaler Mehrkanalbilder. Die Begriffe in Tabelle 2.1 und Abbildung 2.1 findet man häufig in der Literatur.

Tabelle 2.1: Arten digitaler Bilder

Eigenschaft	Bildart			
	ein Kanal	farbig	multispektral	hyperspektral
Anzahl der Kanäle	1	3	$n [2 \leq n \leq 20]$	$n [n > 20]$
Bedeutung der Werte der Pixel	Intensität eines beliebigen Spektrums	Komponenten eines Farbsystems in Analogie zum Farbsehen	Intensitäten mehrerer beliebiger Spektren	Intensitäten schmaler eng beieinander liegender Spektren = spektrale Auflösung für jeden Pixel

2.1.2 Aufnahmekanal für digitale Mehrkanalbilder

Alle modernen bildauflösenden optischen Sensoren basieren auf dem inneren fotoelektrischen Effekt [NL01]. Dazu zählen Sensoren, in denen die durch das einfallende Licht generierten Ladungsträger direkt gezählt werden, sowie Sensoren, in denen die Leitfähigkeit und damit der Photostrom durch das einfallende Licht verändert und ausgelesen wird. In die erste Kategorie fallen Sensoren mit CCD-Technologie (CCD = Charge-coupled Device) [Bau07]. Beispiel für die zweite Kategorie sind Sensoren mit CMOS-Technologie (CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor) [Bau07]. Allen gemein ist, dass nach der Ladungsträgergenerierung nicht mehr bestimmt werden kann, welche Wellenlänge des Lichtes für die Generierung verantwortlich war. Solange das Photon genug Energie hatte, um den Effekt auszulösen und im richtigen Wellenlängenband lag, um im verwendeten Halbleitermaterial transmittiert zu werden, konnte es Ladungsträger generieren.

Beispiel Silizium: Bei Wellenlängen unter ca. 300 nm wird das Licht so stark im Material absorbiert, dass nicht mehr genug zur photoempfindlichen Schicht gelangt. Bei Wellenlängen über ca. 1100 nm reicht die Energie der Photonen nicht mehr aus, um freie Ladungsträger zu generieren [Hau91].

Da photoempfindliche Sensoren höchstens in zwei Dimensionen eine Ortsauflösung bei der Abtastung des Bildes erreichen, sind zusätzliche Mechanismen nötig, um verschiedene Wellenlängen zu unterscheiden (die „dritte“ Dimension). Es können zwei Möglichkeiten der Separation unterschieden werden: zeitliche und örtliche Trennung der Wellenlängen(bänder). Bei der zeitlichen Trennung ist eines der

ältesten Verfahren das einer Filterrad-Kamera, siehe Abbildung 2.2. Dabei werden die Einzelkanäle sequentiell aufgezeichnet, während im Strahlengang vor dem Sensor ein Rad gedreht wird, in dem sich Filter befinden. Der verwendete Filter lässt nur ein bestimmtes Spektrum passieren. Größter Vorteil ist die hohe Flexibilität: Durch Filterwechsel lässt sich das Spektrum eines Kanals einfach verändern. Durch die Filteranzahl kann die Anzahl der Kanäle variiert werden.

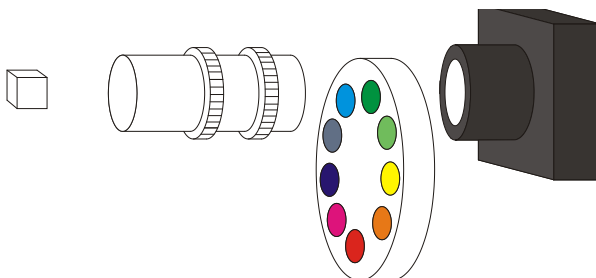


Abbildung 2.2: Filterrad-Kamera

Andere sequentielle Systeme sind zum Beispiel solche, die mit verstellbaren Filtern, zeitlich veränderbarer Beleuchtung oder Fouriertransformationsspektroskopie [ST08] arbeiten. Größter Nachteil der zeitlichen Separation der Kanäle ist, dass bei der Objektszene davon ausgegangen werden muss, dass sie sich während der Aufnahmezeit vernachlässigbar gering verändert oder dass bei festgelegtem Zeitfenster die Integrationszeit je Kanal mit steigender Kanalzahl reduziert wird. In der Praxis ist damit ein Einsatz bei bewegten Szenen sehr eingeschränkt.

Für die örtliche Trennung der Kanäle gibt es viele verschiedene Mechanismen. Der älteste wird in der Fernerkundung eingesetzt. Dabei ist jeder Kanal ein vollständiger optischer Sensor, also mit eigener Optik und Kamera. Die verschiedenen Kanäle sind baugleich aufgebaut und achsparallel angeordnet (Abbildung 2.3), aber für die jeweiligen Spektralbereiche optimiert. Der größte Nachteil, der entstehende Parallaxenfehler, ist bei dieser Anwendung durch den großen Arbeitsabstand vernachlässigbar. Außerhalb der Fernerkundung wird das Prinzip wegen seiner Nachteile kaum eingesetzt.

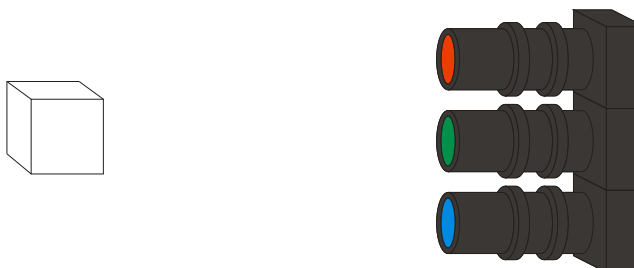


Abbildung 2.3: Parallaxes Mehrkanal-Kamerasystem

Eine weitere Möglichkeit ist eine Strahlengangaufteilung nach der abbildenden Optik. Meist wird diese Möglichkeit durch einen Block aus Prismen mit mehreren dichroitischen Schichten umgesetzt. An jeder Schicht wird das Licht wellenlängenabhängig entweder transmittiert oder reflektiert. Im Gegensatz zu teildurchlässigen Spiegeln sind hier die Verluste deutlich geringer. Die am häufigsten verwendete Bauart dieser Sensoren wird im allgemeinen als Drei-Chip-Kamera bezeichnet (Abbildung 2.4). Dabei hat der Strahlteiler zwei dichroitische Schichten. Damit wird das Licht des sichtbaren Spektrums VIS nach der abbildenden Optik auf drei Matrixsensoren geleitet.

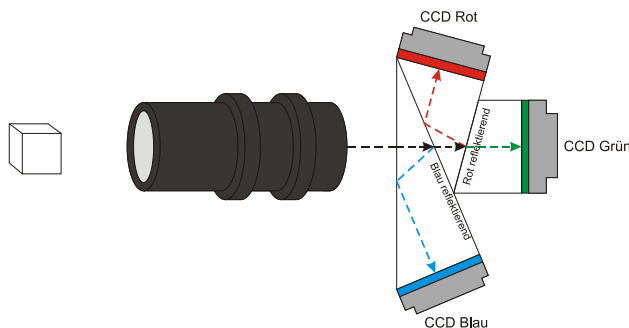


Abbildung 2.4: Mehrkanalsystem mit Strahlteiler (Drei-Chip)

Eine besondere Variante, die nicht sehr verbreitet ist, ist der Foveon-X3-Sensors der Foveon Incorporated (Abbildung 2.5). Hier wird die wellenlängenabhängige Absorption der EM-Strahlung im Volumen des Siliziums ausgenutzt.

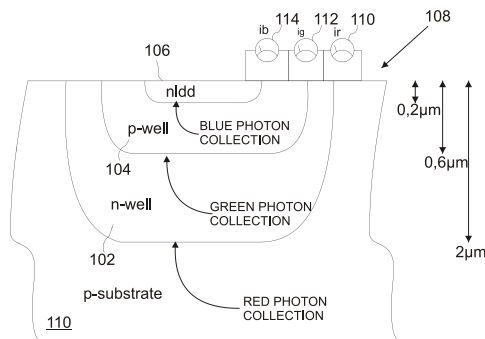


Abbildung 2.5: Prinzipskizze eines Pixels des X3-Sensors [Mer99]

Kürzere Wellenlängen werden stärker absorbiert. Mit zunehmender Eindringtiefe verändert sich deshalb die Filtercharakteristik des durchleuchteten Siliziums. Bei dem X3-Sensor werden die lichtempfindlichen Bereiche in unterschiedlichen Tiefen direkt übereinander angeordnet. Das Signal des Kanals für einen oben liegenden Pixel enthält auch das Signal für die darunter liegenden. Nachträgliche

Signalverarbeitung ist demnach notwendig. Zurzeit werden diese Sensoren nur bei Fotoapparaten der Sigma GmbH eingesetzt.

Die am weitesten verbreitete Variante zur Gewinnung von Mehrkanalbildern, gemessen an der Kamerastückzahl, ist die Verwendung eines Empfängers mit vorgesetztem Filterarray (Abbildung 2.6). Die Gründe für die starke Verbreitung, die technischen Besonderheiten des Prinzips und die Bedeutung für diese Arbeit werden im Unterabschnitt 2.1.8 genauer erläutert.

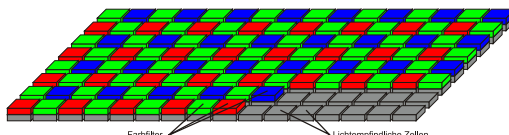


Abbildung 2.6: Sensor mit Filterarray

2.1.3 Unterschiede der Hardware zwischen Einkanal- und Mehrkanal-Bildverarbeitung

Bereits bei monochromen Bildverarbeitungs-Systemen gibt es einige mögliche Unterschiede, die bei Geometriemessungen berücksichtigt werden müssen. Dazu gehören Abbildungsfehler der Optik, Eigenheiten der Abtastung des Bildes mittels des Sensors und Charakteristika der Beleuchtung. Ein Großteil dieser Abweichungen kann gut a priori gemessen und entsprechend korrigiert oder kompensiert werden [Sch08, Neh01, Töp08].

Bei mehr als einem Kanal sind diese Abweichungen nicht gleichmäßig auf die Kanäle verteilt, sondern treten dort sehr unterschiedlich auf. Globale Kompensation ist deshalb nicht ausreichend. Vielmehr muss jeder der Kanäle wie ein eigenständiges monochromes Bild behandelt werden. Zusätzlich müssen die Unterschiede der Kanäle zueinander angepasst werden:

- die Sensorsensitivität für das Spektrum des Kanals
- die Verzeichnung der Optik für den Spektralbereich des Kanals
- die Rasterposition und Auflösung des Sensors für den Kanal

Wird schon bei der Konzeption der Hardware auf diese Aspekte geachtet, kann viel Arbeit bei der Entwicklung der Software sowie an Rechenleistung bei der Anwendung gespart werden.

In folgenden Unterabschnitten werden die Hardwareeigenschaften noch einmal genauer beschrieben.

2.1.4 Einflüsse auf die Messunsicherheit bei Geometriemessungen mittels Bildverarbeitung

Laut dem Internationalen Wörterbuch der Metrologie [DIN94] ist die Messunsicherheit der „dem Messergebnis zugeordnete Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“. Ihre Größe wird entweder aus statistischen Parametern, die sich aus wiederholten Beobachtungen ergeben, gewonnen oder sie wird aus den Beiträgen der Teilsysteme zusammengesetzt. Diese Beiträge zur Messunsicherheit können auf verschiedene Weise bestimmt werden: Systemmodellierung, Erfahrungs- oder Schätzwerte, Herstellerspezifikationen, Handbücher oder vorangegangene Messungen. Bei der Messung mit optischen Sensoren mittels Bildverarbeitung gibt es viele Teilsysteme (siehe Abbildung 2.7). Um die Messunsicherheit gering zu halten, ist es nötig, sowohl die Einzelunsicherheiten der Komponenten zu minimieren, als auch ihr Zusammenspiel zu berücksichtigen. Da die Komponenten bei industriellen Bildverarbeitungssystemen gewöhnlich von verschiedenen Unternehmen stammen, wird das Zusammenspiel der Einzelteile nicht immer abgestimmt. Zudem sind die Komponenten selten für die Koordinatenmesstechnik optimiert.

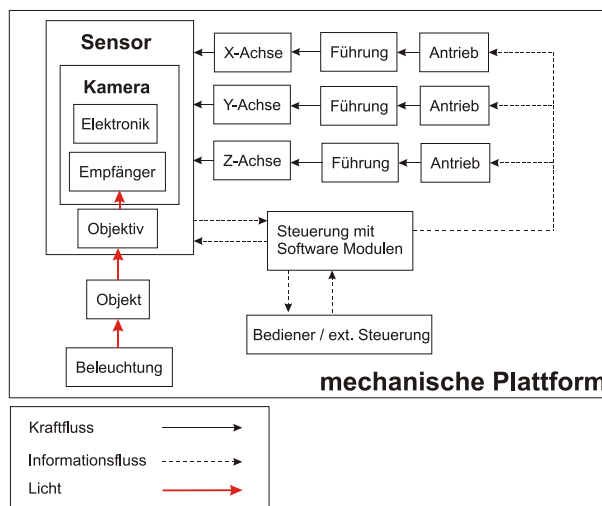


Abbildung 2.7: Komponenten eines KMG mit optischem Sensor

2.1.5 Abbildung der Objektszene

Unter den im Unterabschnitt 2.1.2 zur Möglichkeit der Aufnahme von Mehrkanalbildern beschriebenen Verfahren gibt es einige, bei denen nicht dieselbe abbildende Optik für alle Kanäle genutzt wird. Für diese Arbeit werden diese Verfahren nicht berücksichtigt. Es werden nur Systeme diskutiert, die eine gemeinsame Optik für alle Kanäle haben. Bei Kameras mit CFA nach Bayer-Pattern wird generell nur

ein optisches System für die Abbildung der Kanäle verwendet. Von der Vielzahl optischer Abbildungsfehler sind nur die von besonderem Interesse, die sich für unterschiedliche Kanäle (Spektralbereiche) unterschiedlich auswirken. Das sind Farbquerfehler, Farblängsfehler, Auflösung und Transmissionsgrad.

Farbquerfehler sind wellenlängenabhängige Unterschiede des Abbildungsmaßstabs und der Verzeichnung (siehe Abbildung 2.8) [Haf01].

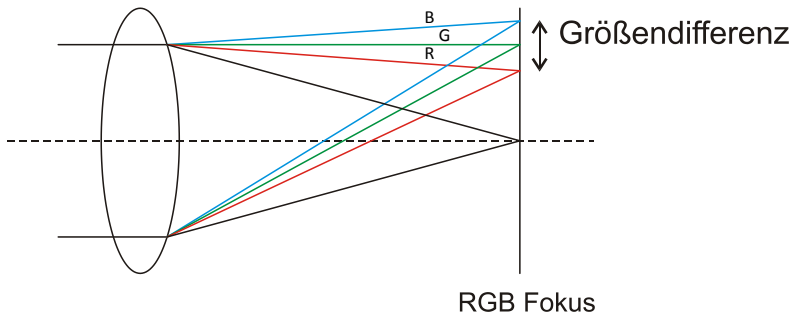


Abbildung 2.8: Farbquerfehler

Solche Fehler würden sich beispielsweise mit einer kanalweisen Verzeichnungskorrektur in der Bildverarbeitung kompensieren lassen, aber nur, wenn sie bekannt und konstant sind.

Farblängsfehler sind wellenlängenabhängige Unterschiede der bildseitigen Schnittweite, oder anders ausgedrückt, Fokusfehler für verschiedene Farben (siehe Abbildung 2.9) [Hec05].

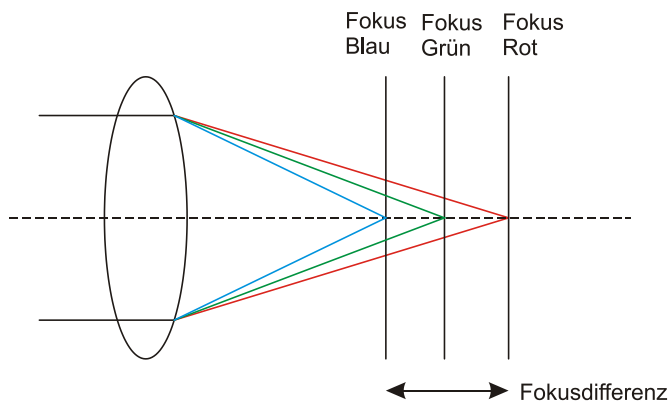


Abbildung 2.9: Farblängsfehler

Farblängsfehler lassen sich praktisch nicht korrigieren. Sie führen zu einem schlechteren Auflösungsvermögen in den Kanälen, die nicht im Fokus sind. Die resultierenden geringeren Signalstärken können theoretisch zu erhöhten zufälligen Fehlern führen, sie bringen aber keine systematischen Abweichungen mit sich. Beide, Farbquerfehler und Farblängsfehler, treten gemeinsam auf. Die getrennte Darstellung (Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9) dient nur der Veranschaulichung. Sowohl Farblängs- als auch Farbquerfehler treten nur bei optischen Systemen auf, die refraktive oder diffraktive Elemente im Strahlengang haben. Rein reflektiv arbeitende Systeme haben diese Fehler prinzipbedingt nicht.

Eine besonders wichtige Eigenschaft der optischen Systeme ist ihr Auflösungsvermögen. Neben verschiedenen anderen Definitionen gibt es eine nach Abbe, die für die Praxis mit abbildenden Optiken sinnvoll ist [LLT97]:

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{2} \cdot \text{NA} \quad (2.1)$$

Das *Auflösungsvermögen* (d) ist von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. Bei der Auswahl des Objektives ist die für die benötigte Auflösung längste genutzte Wellenlänge (λ) zu berücksichtigen. Die Pixelraster werden immer feiner und eine unpassende Paarung von Kamera und Objektiv ist nicht sinnvoll. Sie hat folgende Auswirkungen: Für die subpixelgenaue Kantenortsbestimmung ist die Unterabtastung fatal. Ist die Kante nicht auf mehrere Pixel aufgeteilt, funktionieren Subpixelalgorithmen nicht mehr wie vorgesehen. Die Ergebnisse der Kantenortsbestimmung verschlechtern sich deutlich. Eine zu große Überabtastung ist ebenfalls wenig zweckmäßig, denn es ist zu erwarten, dass durch die kleinere, lichtempfindliche Fläche der Pixel das Signal-Rausch-Verhältnis geringer wird und damit die zufälligen Fehler größer werden.

Nicht zuletzt ist der spektrale *Transmissionsgrad* zu berücksichtigen. Es gibt eine Vielzahl von technischen Gläsern mit Beschichtungen, die in Optiken eingesetzt werden. Sie haben unterschiedliche spektrale Eigenschaften. Welcher Anteil des Lichtes im Objektiv verloren geht, ist von der Wellenlänge abhängig. Für die Spektren, die später die Kanäle repräsentieren sollen, ist also zu überprüfen, ob sie im Linsensystem ausreichend gut übertragen werden können. Für reflektive Systeme gilt das gleiche. Die reflektierenden Schichten (Spiegel) haben von Wellenlängen abhängige Reflektionsgrade.

2.1.6 Abtastung der Abbildung

Durch das optische System wird eine Abbildung der Objektszene auf dem Empfänger erzeugt. Erst durch die Abtastung der Abbildung wird das digitale Bild generiert. Es gibt einige Aspekte, die für Messungen geometrischer Größen im Allgemeinen von Interesse sind und einige, die besonders die Mehrkanalbildverarbeitung betreffen.

Bei der Verarbeitung digitaler Bilder wird fast ausnahmslos das Modell angewandt, dass die Werte der Pixel einer punktuellen Abtastung (infinitesimal kleinen Fläche) der Abbildung entsprechen. Dieses Modell weicht wie jedes andere Modell von der Wirklichkeit ab. Die Zellen des Empfängers nehmen eine bestimmte Fläche ein. Sie sind nicht randlos angeordnet, wie häufig dargestellt, wenn ein digitales Bild zur Anzeige gebracht wird. Ein Maß dafür, wie groß diese Lücken sind, ist der Füllfaktor. Er gibt an, wie viel Prozent der Fläche empfindliche Zellen und wie viel Fläche „blinde“ Bereiche sind.

Der aktuelle Trend in der Hardware ist, den Füllfaktor zu verbessern. Mit der Vergrößerung der empfindlichen Fläche verbessert sich die Sensitivität der Pixel. Stand der Technik in der Software ist, dass bei Operationen der Bildverarbeitung nur Modelle angewandt werden, bei denen der Füllfaktor nicht berücksichtigt wird.

Zusätzlich zur Größe sind die räumlichen Eigenschaften des Pixels von Bedeutung. Die Sensitivität, also welches Signal bei gegebener einfallender Strahlungsleistung generiert wird, ist winkelabhängig. Das ist eine Eigenschaft, die sich durch die vorgesetzte Optik beherrschen lässt. Es wird deshalb bei vielen Objektiven versucht, den bildseitigen Strahlengang telezentrisch zu gestalten. Ein anderer Trend ist, Mikro-Linsen-Arrays auf den Sensor aufzubringen, um den Strahlenverlauf anzupassen. Die Mikrolinsen verbessern über die Änderung der Apertur des Pixels und ihrer größeren Eintrittspupille die Effizienz.

Die Größe der Pixelraster ist für die Koordinatenmesstechnik eine Maßverkörperung und deshalb besonders wichtig. Bei aktuellen industriellen Kameras ist das Rastermaß sehr unterschiedlich. Das Signal, das der Einzelpixel aus der Strahlung generiert, ist ebenso ein wichtiger Wert. Die kleinsten Rastermaße sind $1,7\text{ }\mu\text{m}$, die größten konventionellen liegen etwa bei $10\text{ }\mu\text{m}$. Die Flächen unterscheiden sich um mehr als Faktor 30 (bei gleichem Füllfaktor). Das führt zu deutlich unterschiedlichen Signal-Rausch-Verhältnissen (SNRs). Untersuchungen darüber, wo die zwei gegenläufigen Parameter Maßstabsraster und SNR ihr Optimum haben, gibt es zurzeit nicht. Für die Mehrkanalbildverarbeitung sind die Wellenlängenunterschiede der Sensoren von besonderer Bedeutung. Das betrifft die spektrale Empfindlichkeit des Sensors.

Abgesehen von der offensichtlichen Einschränkung, dass nichts erfasst werden kann, was außerhalb des Spektrums der Sensorsensitivität liegt, ist zu bedenken, dass bei gleicher einfallender Strahlungsleistung das SNR bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich sein kann. Denkbar sind hier Kompensationen auf Seite der Beleuchtungsspektren oder Wichtungen der Ergebnisse aus Messungen in verschiedenen Kanälen.

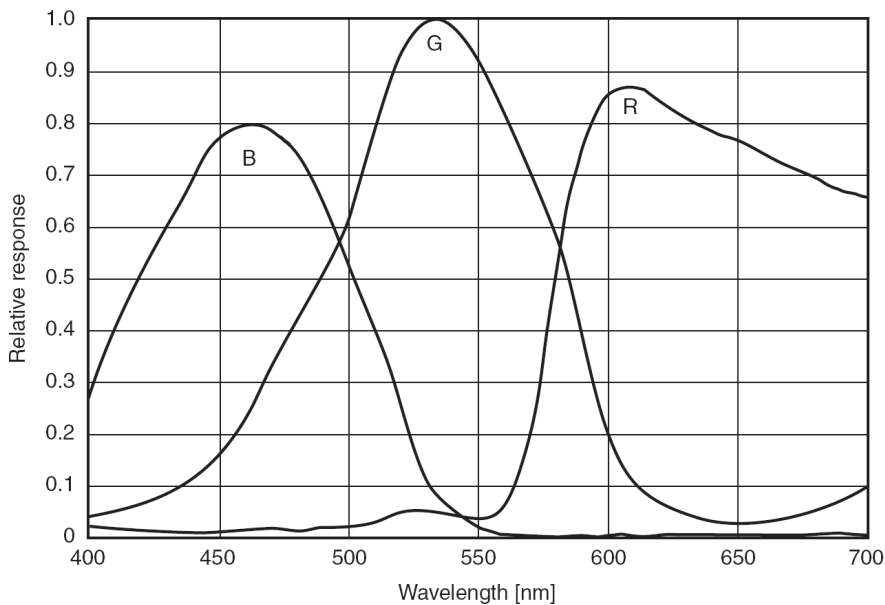


Abbildung 2.10: Spektrale Sensitivität eines Sensors (Sony ICX424AQ) [Son09]

Zusätzlich besteht das Problem, dass die Spektren der Kanäle bei einigen Kameras-typen nicht vollständig getrennt sind (Abbildung 2.10). In Abschnitt 3.5 wird das Verhalten von Bayer-Pattern-CFA-Kameras im Zusammenspiel mit verschiedenen Beleuchtungsspektren untersucht.

2.1.7 Beleuchtung der Objektszene

Bei Beleuchtungen für industrielle Bildverarbeitungssysteme sind drei generelle Eigenschaften zu unterscheiden: spektrales, räumliches und zeitliches Verhalten.

Besondere Parameter wie Kohärenz, Phase oder Polarisation werden an dieser Stelle nicht diskutiert.

Für die Mehrkanalbildverarbeitung ist wichtig, dass die Spektren der Beleuchtung zu den spektralen Empfindlichkeiten der Kanäle des Sensors passen. Stand der Technik bei Koordinatenmessgeräten sind drei verschiedene Lichtquellen.

Am häufigsten werden Kaltlicht-Generatoren [Sch09] mit einer Breitband-Licht-quelle, in der Regel thermische Stahler, eingesetzt. Das sind externe Geräte mit einer „warmen“ Lichtquelle (viel Strahlungsleistung im IR), bei denen nur der für den Sensor interessante Teil des Spektrums, das „kalte“ Licht, durch Filter bis zum Objekt geleitet wird, meist über Lichtleitkabel. [OKM09].

Der zweite Typ sind Breitband-LEDs, also anorganische Leuchtdioden kurzer Wellenlänge mit zusätzlicher Wellenlängenkonversionsschicht (Fluoreszenz). Durch den Vorteil der höheren Effizienz (elektrische Leistung zu Strahlungsleistung) werden diese Lichtquellen häufig direkt im Gerät verbaut [Wer09a, OGP09b]. Das bringt Vorteile aufgrund einfacheren optischen Aufbaus, aber den Nachteil, dass die Abwärme in unmittelbarer Nähe zum Sensor erzeugt wird. Zusätzlich hat diese Lichtquelle den Nachteil, dass das Spektrum nicht so gleichmäßig ist wie bei thermischen Strahlern. Zwischen der Anregungswellenlänge und dem Schwerpunkt der Fluoreszenz gibt es ein lokales Minimum (Beispiel Osram LCW G5GP [OSR09]).

Die dritte verwendete Option sind LEDs als schmalbandige Lichtquellen. Dabei werden anorganische Leuchtdioden (LED) ohne Konversionsschicht verbaut. Diese Lichtquellen werden zurzeit nur zusammen mit monochromen Kameras eingesetzt [Zei09]. Es gibt Geräte, die mehr als eine Lichtfarbe bieten (Beispielsweise Mitutoyo „Quick Vision Hyper“ [Mit09a], oder Zeiss „O-Inspect“ [Zei09]). Genutzt werden sie aber nur als umschaltbare Option und nicht zusammen mit einer Mehrkanalkamera. Organische LEDs spielen bisher in der industriellen Bildverarbeitung eine unbedeutende Rolle, mit verbesserter Technologie (Leistung, Lebensdauer, Kosten) könnten sie aber interessant werden. Ihr Spektrum ist gleichmäßiger und „voller“, trotzdem sind sie „kalt“.

Das räumliche Verhalten von Beleuchtungssystemen ist für jede Art der Bildverarbeitung von sehr hoher Bedeutung. Die Beleuchtung der Objektszene entscheidet maßgeblich darüber, wie die Szene vom Kamerasystem erfasst werden wird. Eine einfache Systematisierung von relevanten räumlichen Anordnungen ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Unabhängig von den dargestellten Parametern ist für alle Beleuchtungen für die Bildverarbeitung die Homogenität der Ausleuchtung der Objektszene ein besonders wichtiges Kriterium.

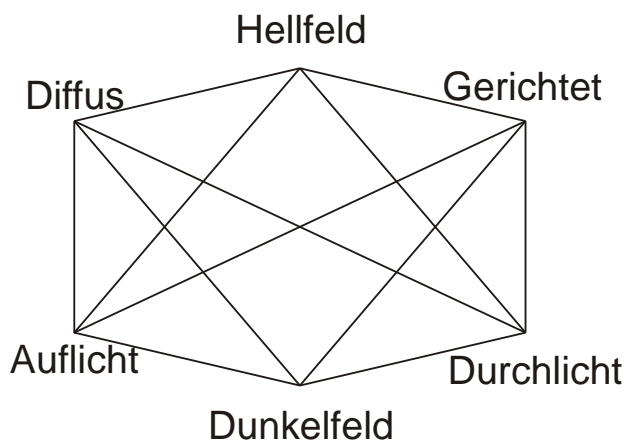


Abbildung 2.11: Kombinationen von Beleuchtungsparametern

Die wichtigen Varianten der Durchlichtleuchten unterscheiden sich durch ihre Strahlcharakteristik. Der Extremfall der Richtcharakteristik der Beleuchtung sind annähernd parallele Strahlen, die sogenannte telezentrische Beleuchtung. Bei Objekten mit Höhenausdehnung führt eine Abweichung vom telezentrischen Strahlengang zu Reflexionen an den Bauteil-Flanken und kann damit die Abbildung negativ beeinflussen. Durchlichtleuchten müssen präzise zum Strahlengang der (ebenfalls telezentrischen) abbildenden Optik ausgerichtet werden. Diffuse Leuchten können andererseits wesentlich kompakter und preisgünstiger aufgebaut werden, benötigen keine besondere Justierung und funktionieren mit allen Objekttypen.

Auflichtleuchten können Hellfeld- und Dunkelfeldbeleuchtungen sein, das heißt man unterscheidet, ob der direkte Reflex der Beleuchtung vom Objekt in das Objektiv fallen kann (Hellfeld) oder ob das Streulicht vom Objekt als hell erfasst wird (Dunkelfeld).

Eine weitere Unterscheidung ergibt sich aus der Abstrahlcharakteristik und der Größe der Lichtquelle. Große diffus abstrahlende Flächen erzeugen „weicheres“ Licht, damit wird die Schattenbildung und Erscheinung von Rauheiten beeinflusst, siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Beispiele für Beleuchtungskonfigurationen

		Auflicht		Durchlicht	
		Hellfeld	Dunkelfeld	Hellfeld	Dunkelfeld
gerichtet					
	diffus				
Legende:		Die dargestellten Konfigurationen sind nur Beispiele an idealen Messobjekten.			
		gestreutes Licht			
		Direktlicht			

2.1.8 Aufnahmekanal für Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array

Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array (CFA) sind Kameras, die nur einen Matrix-Empfänger aufweisen und damit ein Bild mit drei Kanälen gleichzeitig aufzeichnen können. Ermöglicht wird das durch ein spezielles, dem Sensor vorgesetztes, Farbfilterraster (Color Filter Array). Es handelt sich dabei um eine zweidimensionale Matrix, die exakt die gleiche Größe und Rasterung hat wie der photoelektrische Sensor. In dieser Matrix sind drei verschiedene Filtertypen, die sich in ihrem Transmissionsspektrum unterscheiden. Die Anordnung dieser Filter entspricht den Vorgaben von B. E. Bayer [Bay75]. Sie ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

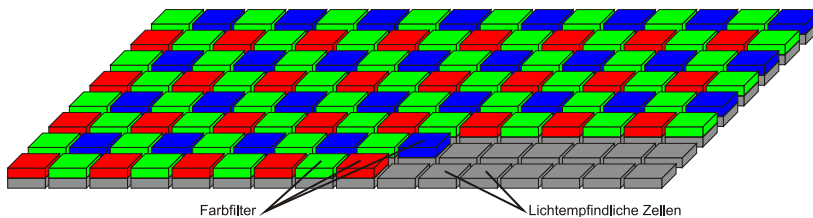


Abbildung 2.12: Filteranordnung nach Bayer

In seinem Patent bezeichnet Bayer die drei Kanäle nicht als Rot-Grün-Blau sondern als einen Luminanzkanal und zwei Chrominanzkanäle. Analog zu den Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung haben die Chrominanzkanäle eine niedrigere Auflösung als der Luminanzkanal. Das Funktionsprinzip dieses Sensors wurde an die Eigenschaften des menschlichen Sehens angelehnt. Der Mensch ist für Helligkeitskontraste empfindlicher als für Farbkontraste [Hen02].

Besonderheiten dieses Filtermusters (Pattern) sind:

- Gleichmäßige Filtterraster für jeden Einzelkanal
- Gleiche Auflösung für den roten und den blauen Kanal
- Um $\sqrt{2}$ erhöhte Auflösung für den grünen Kanal
- Konstante und bekannte Rasterpositionen der unterschiedlichen Kanäle zueinander

Eine weitere Eigenschaft, die nichts mit dem Muster nach Bayer zu tun hat, ist noch erwähnenswert: Die Technologie für die Filterwirkung der einzelnen Elemente basiert auf organischen Farbstoffen. Es findet also eine Absorption der unerwünschten Anteile des Lichtes im Volumen des Filters statt. Das zeigt einige unerwünschte Effekte, die in Abschnitt 3.5 und Abschnitt 4.3 diskutiert werden. Der große Vorteil dieser Filtermatrix ist, dass nur eine Empfängermatrix für

mehrere Kanäle benötigt wird. Die resultierenden geringeren Kosten haben zu einer enorm weiten Verbreitung dieses Kameratyps geführt. Die Hersteller von Kameras produzieren einen sehr großen Anteil ihrer Systeme für eine Nutzung der Bilder, die in Zusammenhang mit dem Menschen steht. Der Anteil von Systemen, die für maschinelles Sehen genutzt werden sollen, ist im Vergleich dazu klein. Für den großen Erfolg seiner Erfindung wurde Bryce Bayer unter anderem 2009 mit dem Progress Award der UK Royal Photographic Society geehrt.

Fast alle Kamera-Sensoren mit Color Filter Array (CFA) weisen eine Filteranordnung nach Bayer auf. Es gibt nur wenige Ausnahmen:

- Die *Fujifilm GmbH* verwendet Matrizen, bei denen die Anordnung der Pixel im Raster nicht rechteckig sondern achteckig ist [Ele09]. Dementsprechend sieht das CFA anders aus.
- Sowohl *Sony* als auch der Erfinder des Bayer Patterns *Kodak* haben versucht, andere Muster einzuführen. Es gab aber bisher keinen nennenswerten kommerziellen Erfolg. [Son03, Kod09]

Die große Verbreitung dieses Sensortyps hat dazu geführt, dass aufgrund der hohen Stückzahlen die Preise für diese Sensoren deutlich niedriger sind als die für andere Mehrkanalsensoren. In industriell genutzten Kameras, in denen Sensoren eingesetzt werden, die auch im Endverbrauchermarkt Verwendung finden, ist die Situation noch extremer. Es gibt dort keinen Preisunterschied zwischen Monochrom- und Farbausführungen des gleichen Kameratyps.

Der Kostenvorteil ist aber nicht das einzige Argument bei der Auswahl einer Kamera für ein Messsystem. Wichtiger ist, dass der Sensor Eigenschaften aufweist, die für die Messaufgabe vorteilhaft sind. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Anwendung der Bildverarbeitung für die Messung geometrischer Größen. Das Raster des Sensors dient als Maßverkörperung. Ein Sensor mit CFA kann Mehrkanalbilder erzeugen und verfügt trotzdem über ein zusammenhängendes Raster auf Siliziumbasis mit niedrigem Wäremausdehnungskoeffizienten.

Neben dem Kostenvorteil haben Sensoren mit CFA für die Geometriemessung einen weiteren Vorteil. Es gibt eine Rasterverschiebung zwischen den Einzelkanälen, diese ist aber bekannt und konstant.

Das am zweithäufigsten eingesetzte Prinzip zur Erzeugung von Mehrkanalbildern im industriellen Umfeld ist ein Strahlteiler und drei Matrixempfänger, häufig „Drei-Chip-Kamera“ genannt.

Bei Drei-Chip-Systemen ist die Rasterverschiebung zwar klein – die meisten Hersteller geben $1/4$ Pixel an –, aber nicht bekannt, bei jedem Exemplar verschieden und nicht konstant, weil Werkstoffe mit unterschiedlichen Wäremausdehnungskoeffizienten eingesetzt werden. Bei Erwärmung des Systems können sich die

relativen Positionen der Raster zueinander ändern. Konstanz über längere Zeiträume ist ebenfalls nicht garantiert. Diese Probleme gibt es bei CFA-Sensoren nicht. Prinzipbedingt haben die Einzelkanäle immer feste Positionen zueinander.

Aus dem Aufbau mit CFA vor dem Sensor ergibt sich eine weitere Besonderheit. Die Daten der Einzelkanäle, wie sie der Sensor liefert, können nicht direkt genutzt werden. Die Einzelkanäle weisen „Löcher“ bei der Abtastung des Bildes auf, siehe Abbildung 2.13.

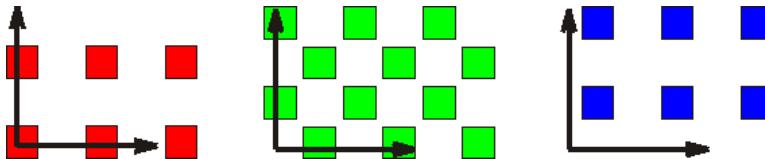


Abbildung 2.13: Einzelkanäle eines CFA-Sensors

Zusätzlich sind, wie bereits erläutert, die Rasterpositionen zueinander verschoben. Deshalb ist eine Rekonstruktion des vollaufgelösten Mehrkanalbildes nötig. Dieser Prozess wird als *Demosaiking* bezeichnet (vom Wort Mosaik, wegen des mosaikartigen Aufbaus des CFA). Stand der Technik bei den Demosaiking-Verfahren ist, dass es für Fotografie-Anwendungen sehr viele verschiedene Methoden gibt. Viele Firmen und auch nichtkommerzielle Einrichtungen beschäftigen sich mit der Entwicklung neuer Methoden. Das Ziel bei Fotografie-Anwendungen ist, möglichst „gut aussehende“ Bilder zu erzeugen, also Bilder, die dem menschlichen Betrachter hochauflösend und farbecht erscheinen. Für industrielle Bildverarbeitung sind die Ziele nicht generalisierbar, sondern stark von der Applikation abhängig. Deshalb sind den Zielen angepasste Demosaikingverfahren äußerst selten. Eines der wenigen Beispiele ist das Patent von der Firma Baumer [RV08]. Der Anspruch dabei ist, dass im Ergebnisbild die Farben jedes Pixels besonders gut der CIE-LAB-Norm entsprechen – die entsprechende deutsche Norm dafür ist die DIN 6174. Wie viele Firmen ähnliche Verfahren einsetzen, aber weder Schutzrechte noch Veröffentlichungen dazu anfertigten, ist nicht bekannt.

Ein weiterer Aspekt bei industrieller Bildverarbeitung ist, dass gewöhnlich das fertige Produkt nicht nur von einem Unternehmen entwickelt wird, sondern dass es aus verschiedenen zugekauften Komponenten besteht. Bei Gesprächen mit Vertretern verschiedener Unternehmen hat sich herausgestellt, dass das Problem des Demosaikings jeweils einem anderen Glied in der Kette des Gesamtsystems zugeordnet wird: Hersteller von Gesamtgeräten und Entwickler von Softwarepaketen sagen, das Demosaiking gehöre zu den Aufgaben der Kamerahersteller, das Farbbild würde so genutzt, wie es der Treiber der Kamera zu Verfügung stellt. Dem gegenüber sagen Kamerahersteller, sie bieten nur einfachste Demosaiking-Verfahren in ihren Treibern an, alles was darüber hinausgeht, ist der nachfolgenden Software überlassen. Die Rohdaten können von der Kamera abgerufen werden, die gesonderte

Verarbeitung ist damit möglich. Es ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit kein Demosaikingverfahren bekannt, das für die Messung geometrischer Größen mittels Bildverarbeitung optimiert wurde.

2.2 Kantenortsbestimmung in digitalen Bildern

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Prinzipien zur Bestimmung von Kanten in Bildern, die sogenannte „Kantenextraktion“ und die „Kantenortsbestimmung“.

Mit „Kantenextraktion“ ist die pixelbasierte Kantenort-Suche gemeint. Es werden einzelne Pixel markiert, die zu der Kante gehören oder auf der Kante liegen. Das geschieht üblicherweise durch Anwendung eines Kantenoperators (Roberts, Sobel usw.) [KZ92] mit nachfolgender Binarisierung. Unter Umständen gibt es zusätzliche morphologische Operatoren wie Erosion oder Dilatation [Tön05]. In jedem Fall sind die Ergebnisse Kantenpixel und nicht Kantenkoordinaten.

Bei der Kantenortsbestimmung werden die Werte der Pixel in einem zuvor bestimmten Bereich des Bildes oder auch im gesamten Bild, analysiert und nach definierten Kriterien so ausgewertet, dass Kantenortskordinaten gewonnen werden.

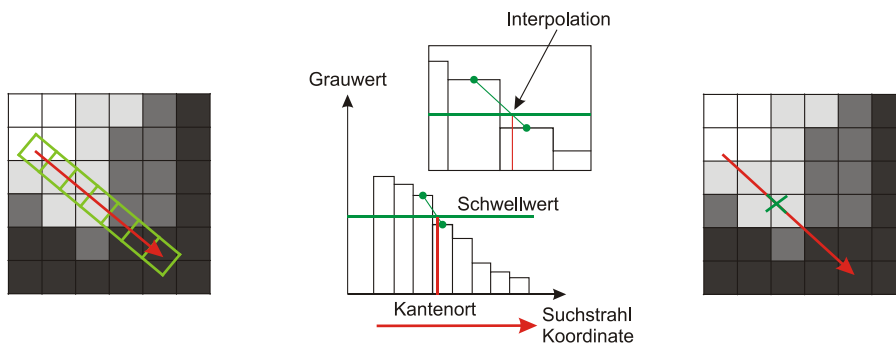


Abbildung 2.14: Suchstrahlbasierte Kantenortsbestimmung

Sehr häufig handelt es sich um suchstrahlbasierte Kantenortsbestimmung (Abbildung 2.14): Der zu analysierende Bereich ist ein schmales Band von Pixeln, der Suchstrahl, von dem vermutet wird, dass er orthogonal zur gesuchten Kante liegt. Seine Lage kann beispielsweise durch die Erfahrung des Bedieners der Maschine über die Messszene oder mit Hilfe von vorangegangenen Kantenextraktionsverfahren aus dem Bild gewonnen werden. Aus diesem schmalen Band wird mit geeigneten Mitteln ein einzelner Grauwertverlauf errechnet. Ob das Ergebnis diskrete Werte sind oder eine stetige Funktionen ist, ist dabei irrelevant. Auf diesem Grauwertverlauf wird dann mittels eines Kriteriums der Kantenort bestimmt. Das kann zum Beispiel ein einfacher Schwellwert, der maximale Anstieg oder auch ein

integrales Kriterium sein. Die gewonnenen Koordinaten auf dem Suchstrahl werden dann wieder zurück in Bildkoordinaten bzw. in Objektkoordinaten gewandelt.

Für die eigentliche Messung von geometrischen Größen sind weitere Schritte nötig. Aus einer großen Anzahl von Objektkantenpunkten wird mit einer Ausgleichsrechnung das geometrische Element errechnet. Hier ist wieder Vorwissen und Erfahrung von Bedeutung. Eine falsche Wahl der Ausgleichsgeometrie kann zu groben Messfehlern führen, wenn beispielsweise ein Kreis statt einer Ellipse eingesetzt wird. Dieser Schritt ist aber unabhängig von der Art, wie die Punkte bestimmt wurden. Zudem ist das Wissen über die Relation vom Pixelraster zu Größen im Objektraum nötig: „Welche Fläche im Objektraum wird durch welchen Pixel repräsentiert?“, „Wie groß ist der projizierte Pixel in der Objektebene?“

2.2.1 Pixelgenaue Kantenortssuche

Bei der pixelgenauen Kantenortssuche („Kantenextraktion“) wird auf das Bild ein Kantenfilter angewendet. Dabei wird das 2D-Intensitätssignal, das das Bild darstellt, differenziert, um so Objektkanten hervorzuheben. Bei diskreten Bildern wird das Differenzieren des Signals durch Differenzen von Pixelwerten ersetzt. Ergebnis eines Kantenfilters ist ein Merkmalsbild, ein „Kantenbild“, in dem Veränderungen hell erschienen, während alle anderen Bereiche dunkel bleiben [Jae09] - nicht zu verwechseln mit dem Begriff Kantenbild in der Optik, bei dem die Abbildung einer Kante gemeint ist -. Bekannte und häufig eingesetzte Kantenfilter sind:

- Roberts-Kantenoperator
- Sobel-Kantenoperator
- Kirsch-Kantenoperator
- Laplace-Kantenoperator

Sie funktionieren alle auf Basis von Faltungskernen, mit denen die Differenzen für das Kantenbild berechnet werden. Die Kantenfilter unterscheiden sich durch das Kriterium zur Beschreibung der Kante und der daraus resultierenden Beschaffenheit der Faltungskerne (z. B. Gradientenbetrag oder Nullstelle der zweiten Ableitung). Die Summe der Koeffizienten der Faltungskerne ist immer Null, um die Bedingung zu erfüllen, dass gleichmäßige Flächen geringe Grauwerte im Kantenbild erzeugen [KZ92].

Der Roberts-Kantenoperator ist einer der ältesten Operatoren. Er besteht aus zwei Faltungskernen für die diagonalen Differenzen:

$$k_{d1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * b \quad (2.2)$$

$$k_{d2} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} * b \quad (2.3)$$

$$k = |k_{d1}| + |k_{d2}| \quad (2.4)$$

Seine Vorteile sind, dass er einfach zu berechnen ist und dass er schmalere Kanten erzeugt als andere Filter. Seine Nachteile sind die höhere Empfindlichkeit für Rauschen und die erhöhte Empfindlichkeit der Diagonalen gegenüber den Horizontalen und Vertikalen.

Beim Sobel-Kantenoperator werden zwei 3×3 -Pixel-große Faltungskerne verwendet. Sie sind für die horizontale und die vertikale Kante ausgerichtet, nicht wie bei Roberts für Diagonalen. Der jeweilige Faltungskern beim Sobel-Kantenoperator entspricht einer Differentiation orthogonal zur Kante und gleichzeitig einer gewichteten Mittelung in Kantenrichtung zur Rauschunterdrückung [KZ92]:

$$k_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -2 \end{bmatrix} * b \quad (2.5)$$

$$k_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * b \quad (2.6)$$

$$k = |k_y| + |k_x| \quad (2.7)$$

Vorteile sind die relativ einfache Berechenbarkeit und die leicht verbesserte Rauschunterdrückung im Vergleich mit Roberts. Nachteile sind die stärkere Weichzeichnung (breitere Linien im Kantenbild) und die unterschiedlichen Empfindlichkeiten für verschiedene Richtungen.

Beim Kirsch-Kantenoperator wird der Ansatz der richtungsabhängigen Differentiation verfeinert. Er besteht aus acht unterschiedlichen Faltungskernen, für jeweils um 45° gedrehte Kanten. Dabei wird das Modell der Kante in einer der acht Grundstellungen dargestellt. Es findet ebenfalls eine Glättung in Kantenrichtung statt.

Der Laplace-Kantenoperator ist die zweidimensionale, diskrete zweite Ableitung der Grauwertfunktion. Er basiert auf dem Modell, dass Kanten Nulldurchgänge der zweiten Ableitung des Grauwertverlaufs sind. Eine diskrete Näherung des Laplace-Operators ist:

$$k_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * b \quad (2.8)$$

Der Faltungskern berücksichtigt nur die vier direkt benachbarten Pixel. Es gibt andere diskrete Näherungen für diesen Operator, die in ihren Eigenschaften ähnlich sind. Die Rauschempfindlichkeit ist höher als bei Sobel oder Kirsch, deshalb wird der Laplace-Kantenoperator in der Praxis hauptsächlich in Kombination mit zusätzlicher Rauschunterdrückung eingesetzt („LoG-Filter“).

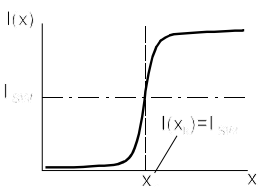
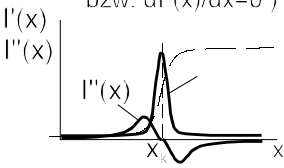
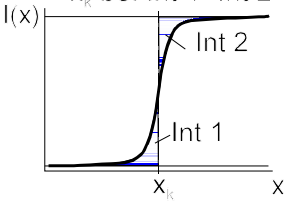
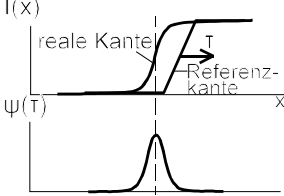
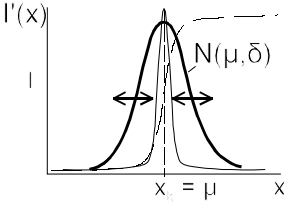
Die pixelgenaue Kantenortssuche kann im Anschluss an einen dieser Filter z. B. über einen Schwellwert erfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass alle Filter außer Roberts mindestens zwei Pixel breite Kanten erzeugen. Die Information des Kantenortes bezieht sich in jedem Fall nur auf die „Adresse“ von Pixeln, Koordinatenberechnung muss gesondert erfolgen.

Stand der Technik bei Kantenfilterung in Mehrkanalbildern ist eine Kombination der Kantenbilder der Einzelkanäle. Eine einfache Mittelwertbildung ist nicht sinnvoll, da bei konträren Daten in den Kanälen eine Auslöschung auftreten würde. Sinnvoller ist laut [Jae09] die Summe der quadrierten Beträge der Gradienten aller Kanäle. Generell wird das Thema in der Literatur hauptsächlich theoretisch betrachtet. Es gibt keine vergleichbar populären Kantenoperatoren wie für Ein-Kanal-Bilder.

2.2.2 Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung

Bei der subpixelgenauen Kantenortsbestimmung werden bevorzugt eindimensionale Subpixelverfahren eingesetzt. Dabei wird entlang einer definierten Strecke im Bild, dem so genannten „Suchstrahl“, nach der Erfüllung des Kantenortskriteriums gesucht, siehe Tabelle 2.3. Der Kantenort im Bild ergibt sich aus der Lage des Suchstrahls sowie dem Abstand des Kantenortes vom Beginn des Suchstrahls. Die Suchstrahlen können sowohl rastersynchron, also parallel zu einer Pixelzeile oder -spalte, als auch frei im Bild liegen. Für viele Subpixelverfahren ist es vorteilhaft, wenn der Suchstrahl orthogonal zur erwarteten Kante liegt. Weil die Kanten nur in Ausnahmefällen rastersynchron liegen, ist die rastersynchrone Lage des Suchstrahls selten. In der Regel müssen die Grauwerte des eindimensionalen Suchstrahls aus dem Raster des Originalbildes berechnet werden. Dies kann zum Beispiel durch bilineare Interpolation erfolgen. Die Erzeugung der Daten für den Suchstrahl gehört nach [Küh97] zu der Vorverarbeitung. Ob die Daten als diskrete Grauwerte oder analytische Funktionen vorliegen, ist nicht festgelegt. Stand der Technik ist, dass dafür eine Serie diskreter Grauwerte erzeugt wird.

Tabelle 2.3: Übersicht der grundlegenden Kantenortskriterien [Küh97]

Kriterien/Definition	Eigenschaften	Literatur
Schwellwert 	<ul style="list-style-type: none"> • stark von Intensitätsschwankungen abhängig • wird bei Auflichtstrukturen mit geringen Gradienten im Bildintensitätsverlauf angewendet 	[WRC84] [CR85] [FB90] [LBN88] [NF94]
Differentielle x_k bei $\text{Max}(dI(x)/dx)$ bzw. $dI^2(x)/dx=0$ 	<ul style="list-style-type: none"> • verstärken den Einfluss hochfrequenter Rauschanteile infolge Hochpassverhaltens • bei Anwendungen von Interpolationsfunktionen sind diese stark störsignalabhängig • der Einsatz von Approximationsverfahren, die rauschmindernde Wirkung besitzen, ist sinnvoll 	
Integrale/Fotometrische x_k bei $\text{Int } 1 = \text{Int } 2$ 	<ul style="list-style-type: none"> • berücksichtigt optimal die integrierenden Eigenschaften des idealen Sensors • kein systematischer Verfahrensfehler bei idealem Signal und Sensor • Probleme bei der praktischen Umsetzung infolge der Unsicherheit bei der Bestimmung der Integrationsgrenzen im verrauschten Hellgebiet und Abweichung des realen Sensors vom Ideal (keine direkt angrenzenden Integrationsgebiete, Übersprechen) 	
Korrelation 	<ul style="list-style-type: none"> • tolerant gegenüber stochastischen Einflussfaktoren und Abweichungen im Bildsignalverlauf • spricht aber auch auf im Intensitätsverlauf ähnliche Störstrukturen an • hoher Rechenaufwand 	
Parameterschätzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung statistisch basierter Methoden (Maximum-Likelihood, Gaußsche Methode der kleinsten Fehlerquadrate) auf den differenzierten Bildintensitätsverlauf • optimale Störunterdrückung stochastischer Einflüsse 	[Smi91] [Wei90] [Wer89] [Rot90]
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> I – Bildintensität I' – 1. Ableitung Bildintensität I'' – 2. Ableitung Bildintensität x_k – Kantenort </div> <div> Int – Flächenintegral Ψ – Korrelationskoeffizient N – Gaußsche Normalverteilung μ – Mittelwert σ – Standardabweichung </div> </div>		

Die Blockstruktur in Abbildung 2.15 ist nur eine grobe Richtlinie. Die Umsetzung in Bildverarbeitungssoftware und Gerätesoftware von Mess- und Prüfmaschinen kann durchaus davon abweichen.

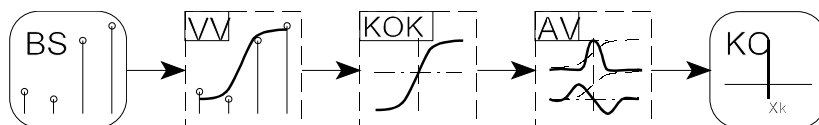


Abbildung 2.15: Blockstruktur von Subpixelverfahren [Küh97]

BS – Bildsignal

VV – Vorverarbeitung

KOK – Kantenortskriterium

AV – Auswerteverfahren

KO – Kantenort

Der Einsatz eines Kantenortskriteriums auf einen eindimensionalen Datensatz ist jedoch sehr häufig der Kern. Welches Kriterium angewendet, wird hängt von den Rahmenbedingungen ab:

- Objekteigenschaften (z. B. scharfe Kante oder ein Bauteil mit Fase?)
- Beleuchtungskonfiguration (Schattenwurfbild oder Aufsichtszene?)
- Sensoreigenschaften (SNR, lineares Signalverhalten?)
- usw.

Die Methoden der subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Ein-Kanal-Bildern auf Mehrkanalbilder zu übertragen, ist nicht ohne weiteres möglich. Es könnten zwar die Kantenorte in den Einzelkanälen bestimmt werden. Wie aber mit unterschiedlichen Orten der Kante in den verschiedenen Kanälen des selben Bildes umgegangen wird, ist problematisch. Sinnvoller ist es, eine spezielle Kantenortsbestimmung für Mehrkanalbilder zu verwenden.

2.2.3 Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern

In den aktuell verfügbaren Bildverarbeitungsbibliotheken für industrielle Bildverarbeitung gibt es keine fertigen Algorithmen für subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in Mehrkanalbildern. Es gibt ein Patent[UB00], welches einen vektoriellen Ansatz beschreibt. Dabei bleiben aber einige Fragen offen. Das Ergebnis der dort angewendeten eindimensionalen Vektordifferenz ist ein Grauwertverlauf, bei dessen Maximum der Kantenort zu erwarten ist. Es ist aber weit davon entfernt, ein praktisch anwendbares Verfahren zu sein.

Kantenoperatoren für Mehrkanalbilder werden, wie bereits in Unterabschnitt 2.2.1 erwähnt, vornehmlich theoretisch abgehandelt. Dazu kommt, dass die Kantenortsbestimmung passend zu diesen Kantenbildern fehlt. Bei Koordinatenmessgeräten, die mit bildauflösenden Mehrkanalsensoren ausgestattet sind, ist der Stand der Technik, dass nur ein Grauwertkanal für die subpixelgenaue Kantenortsbestimmung verwendet wird. Es werden dabei Verfahren wie die aus Unterabschnitt 2.2.2 verwendet.

2.2.4 Bedeutung der Kantenortsbestimmung für die Präzisionsmessung geometrischer Größen

Bildverarbeitung wird nicht nur für Bilder eingesetzt, die mittels Licht erzeugt wurden. Auch in der Koordinatenmesstechnik gibt es Anwendungen, bei denen die Bilder nicht mit Licht erzeugt werden, z. B. Tomographen, oder Terahertz-Techniken [Wer09b, Ind09]. Diese Technologien und die damit verbundene Bildverarbeitung soll aber nicht Inhalt dieser Arbeit sein. Bildverarbeitung für Koordinatenmesstechnik bezieht sich hier ausschließlich auf Bilder, die mit 2D-Kameras aufgezeichnet wurden und von Abbildungen mit sichtbarem Licht (VIS) oder angrenzenden Spektralbereichen (UV, NIR, IR) stammen.

Optische Sensoren mit Bildverarbeitung gehören heute mit zu den wichtigsten Sensoren für die Messung geometrischer Größen. Die Hauptvorteile gegenüber taktilen Sensoren sind: Es wird quasi rückkopplungsfrei gearbeitet und der Einfluss auf das Objekt durch das zur Abtastung genutzte Medium (Licht) ist gewöhnlich vernachlässigbar gering. Allgemein wird von einer berührungslosen Messung gesprochen.

Es werden sehr viele Messwerte praktisch zeitgleich aufgezeichnet. Durch den zweidimensionalen Charakter des Sensors ist es möglich, ein gewisses Feld des Objektraums parallel zu erfassen. Im Gegensatz zu scannenden Verfahren, bei denen jeder Messwert sequentiell aufgezeichnet wird, werden hier alle Werte des festen Rasters zur gleichen Zeit erfasst.

Besonders wichtig sind berührungslose Sensoren für Objekte, die durch die Messkraft beeinflusst werden würden. Die Kraft könnte zu einer Messwertverfälschung führen oder das Objekt beschädigen. Auch für bewegte oder sich verändernde Objekte ist eine zeitgleiche Messpunkterfassung, wie sie optische Sensoren bieten, nötig. Nicht zuletzt kann mit optischen Sensoren unter bestimmten Bedingungen um ein Vielfaches schneller gemessen werden. Wenn sehr viele unabhängige Messpunkte auf kleinem Raum liegen, muss ein taktiler Sensor vielfach bewegt werden, während ein optischer Sensor sehr viel auf einmal erfassen kann.

Aus Sicht der Kanalanzahl gibt es bei aktuellen KMGs nur zwei Fälle zu unterscheiden. Die größere Anzahl von Geräten nutzt monochrome Sensoren. Welches

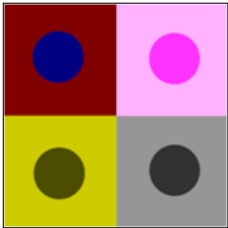
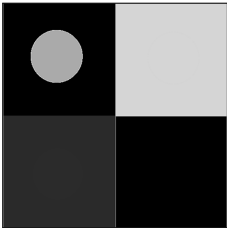
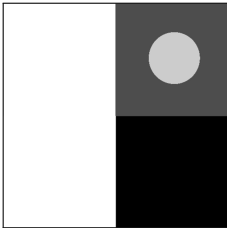
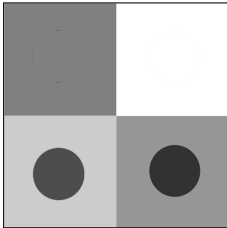
Spektrum das digitale Bild dann repräsentiert, hängt hauptsächlich vom Beleuchtungsspektrum ab. Die andere Ausführung sind Farbkameras. Es sind Drei-Kanal-Systeme, bei denen die spektrale Empfindlichkeit des Gesamtsystems (Sensor + Beleuchtung) an der menschlichen Wahrnehmung orientiert ist.

Der Mensch, der Bediener der Maschine, kann trichromatisch sehen, deshalb ist ein farbiges Livebild besser für die Ergonomie der Bedienung. Eine gute Nachempfindung des menschlichen Sehens beim dargestellten Bild hilft zudem bei subjektiven Inspektionsaufgaben. Um Geometrien von Bauteilen aus einem einzigen Werkstoff zu messen, reicht einfache Grauwertbildverarbeitung gewöhnlich aus. Es gibt keine Unterschiede des spektralen Reflektionsgrades, also muss durch die räumliche Struktur und Charakteristik von Beleuchtung und Optik ein ausreichend großer Kontrast für das Messverfahren sichergestellt werden. Farb- und Mehrkanalbildverarbeitung können jedoch Vorteile bringen, wenn auch Beugung und Brechung eine Rolle spielen. Beispiele sind angelaufene Metalle, andere farbliche Änderungen der Oberfläche oder Beugungseffekte an feinen Oberflächenstrukturen oder Kanten.

Trotz dieser „Einfarbigkeit“ werden einige optische Sensoren mit Farbkameras ausgerüstet, z. B. viele Geräte der OGP Messtechnik GmbH [OGP09b] oder der Werth Messtechnik GmbH [Wer09a].

Obwohl Farbkameras eingesetzt werden, ist der Stand der Technik bei Koordinatenmessgeräten, dass die Hersteller nur einen Kanal für die Messung nutzen. Und zwar nicht einen der Farbkanäle sondern den Intensitäts- oder Helligkeitskanal, der durch eine HSI-Transformation [GW07] (oder ähnliche) erzeugt wurde. Die Informationen aus dem Farbtonkanal und dem Farbsättigungskanal werden vollständig verworfen.

Tabelle 2.4: Kanäle des Farbbildes im HSI-Farbsystem

Farbbild	Farbtonkanal	Farbsättigungskanal	Intensitätskanal
			

In den Datenblättern oder Betriebsanweisungen finden sich keine Hinweise auf dieses Funktionsprinzip. Es sind keine Schutzrechte oder Veröffentlichungen zu dem Thema bekannt. Die Information, wie Hersteller von KMGs mit Farb- und Mehrkanalbildern umgehen, war ausschließlich mündlich bei direktem Kontakt zu erfragen.

2.2.5 Zusammenfassung des Standes der Technik und Präzisierung der Aufgabenstellung

Die Analyse des Standes der Technik zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung ergibt folgende Feststellungen: Erfassung und Verarbeitung von Mehrkanalbildern, insbesondere Farbbildern ist Stand der Technik. Kameras für die Erfassung von drei Kanälen sind in vielen Bereichen Quasi-Standard. Die Algorithmen zur Vorverarbeitung, Darstellung und Analyse sind jedoch fast ausschließlich an den Besonderheiten des menschlichen Sehens ausgerichtet. Der Preis von Mehrkanalkameras auf Basis von Sensoren mit CFA ist gleich dem Preis vergleichbarer monochromer Kameras. Es gibt keine schwerwiegenden Gründe, auf die Zusatzinformation durch mehr Kanäle für Machine-Vision-Aufgaben zu verzichten. Bei der Präzisionsmessung geometrischer Größen werden sowohl monochrome als auch Mehrkanalkameras eingesetzt. In den letzten Jahren hat der Einsatz von Mehrkanalkameras deutlich zugenommen, insbesondere solcher mit CFA-Sensoren. Die zusätzlichen Informationen aus Mehrkanalbildern werden aber bisher nicht für die subpixelgenaue Kantenortbestimmung genutzt, sondern nur für andere Zwecke, wie zum Beispiel die Farbbilddarstellung.

Daraus ergibt sich die präzisierte Aufgabenstellung für diese Arbeit: Werden Geometrieinformationen aus digitalen Bildern gewonnen, sind bei Bildaufnahme, Bildvorverarbeitung und Bildauswertung die besonderen Eigenschaften von Mehrkanalsystemen zu beachten. Die Analogie zur menschlichen Wahrnehmung ist bei Machine-Vision-Aufgaben weit weniger bedeutungsvoll - die Bedienbarkeit darf aber nicht leiden. Deshalb ist es sinnvoll, die Bildverarbeitungsverfahren der digitalen Mehrkanalbilder speziell für die Messung geometrischer Größen zu optimieren oder neu zu konzipieren. Das betrifft besonders den Bildaufnahmekanal für Sensoren mit Bayer-Pattern-CFA. Der erhöhte Informationsgehalt der Mehrkanalbilder, der damit zu Verfügung steht, sollte auch für die Geometriemessung genutzt werden. Ein neues Verfahren zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Mehrkanalbildern wird deshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit entworfen, umgesetzt und getestet. Nicht zuletzt ist eine Anforderung, dass das neue Verfahren ohne große Komplikationen in vorhandene Softwarestrukturen integrierbar ist, damit einer Überführung in die Praxis (z. B. für Koordinatenmessgeräte) nichts im Wege steht.

3 Theoretische Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern

3.1 Informationen in digitalen Bildern

Eine allgemeingültige Methode zur Quantifizierung von nützlichen Informationen in Bildern gibt es nicht. Was als *nützlich* gilt, ist abhängig von den Zielen so unterschiedlich, dass eine allgemeine Berechnung nicht möglich bzw. sinnvoll ist. Es gibt verschiedene spezifische Quantifizierungen für unterschiedliche Ziele.

Für die Bewertung von Informationen für Messaufgaben gibt es beispielsweise die *Messinformationsqualität* nach Linß [Lin05]. Sie ist das Verhältnis des metrologischen Auflösungsvermögens zu den bei der Messung entstehenden Kosten und der benötigten Zeit:

$$Q = \frac{\text{ld } \hat{m}}{t_e K} \quad (3.1)$$

mit Q Messinformationsqualität, ld Logarithmus Dualis, \hat{m} maximales metrologisches Auflösungsvermögen, t_e Einstellzeit, K Kosten.

Dieser Ansatz lässt sich theoretisch von einem eindimensionalen auf mehrdimensionales System übertragen. Das maximale metrologische Auflösungsvermögen bei digitalen Bildern ist aber nicht einfach zu bestimmen. Es gibt sowohl örtliche als auch Intensitäts-Dimensionen, die unterschiedlich aufgelöst werden. Die für die Messung geometrischer Größen relevante Auflösung ist von diesen Einzelauflösungen abhängig.

Für Anwendungen wie Speicherung oder Datenübertragung digitaler Bilder wird ein anderes Maß verwendet, um die Informationen zu beziffern: der *Informationsgehalt*. Er ist nicht gut geeignet um nützliche Informationen zu bewerten, könnte aber dafür verwendet werden, Ein- und Mehrkanalbilder gegenüber zu stellen.

3.1.1 Informationsgehalt in digitalen Bildern

Der maximal mögliche Informationsgehalt eines digitalen Bildes ergibt sich aus den möglichen verschiedenen Intensitätsstufen eines Kanals, aus der Anzahl der Bildelemente (Pixel) und aus der Anzahl der Kanäle. Er wird in Bit angegeben.

$$I_{\max} = \log_2 N_x \cdot N_y \cdot N_{\text{Ch}} \quad (3.2)$$

Das Auflösungsvermögen a der Grauwerte ist ein Maß dafür, wie viele verschiedene Intensitätsstufen unterschieden werden bzw. wie viele verschiedene Symbole zur Beschreibung der Intensität des Pixels zur Verfügung stehen. N_x und N_y sind die Anzahl der Pixel in den zwei lateralen Dimensionen des Bildes. Die Anzahl der Kanäle N_{Ch} beschreibt, wie viele Grauwerte pro Pixel vorhanden sind, diese können z. B. die Intensitäten verschiedener Spektralbereiche repräsentieren, siehe auch Unterabschnitt 2.1.1.

Beispiel: Ein Farbbild mit einer SXGA-Auflösung und 256 Graustufen pro Kanal hat einen maximal möglichen Informationsgehalt von:

$$\begin{aligned} I_{\max} &= 8 \text{ bit} \cdot 1280 \cdot 1024 \cdot 3 \\ &= 31\,457\,280 \text{ bit} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Reduziert wird dieser Maximalwert in der Praxis durch unterschiedliche Auftretswahrscheinlichkeiten eines Grauwertes. Ein Beispiel sind übersteuerte Bilder. Hier tritt der höchste Grauwert häufiger auf als alle anderen. Generell sind die Wahrscheinlichkeiten der Grauwerte eines digitalen Bildes von der abgebildeten Szene abhängig. Die unterschiedlichen Auftretswahrscheinlichkeiten werden bei verlustfreien Komprimierungsverfahren genutzt, z. B. Huffman-Codierung [Str05].

Des Weiteren können statistische Abhängigkeiten den Informationsgehalt senken. Dabei bedingt das Auftreten eines Grauwertes die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von den Grauwerten in seiner Pixelnachbarschaft. Die Ursache für diese bedingten Wahrscheinlichkeiten ist, dass ein großer Teil der Signale von analogen Informationsquellen (z. B. die Abbildung einer Intensitätsfunktion auf einem Sensor) niederfrequent ist. Es erfolgt für viele der Signale nur eine langsame Änderung entlang der abgetasteten Koordinaten [Wer08]. Solche Eigenschaften von Bildern werden bei verlustbehafteten Komprimierungsverfahren ausgenutzt, z. B. bei JPEG-Komprimierung [Str05]. Die vorhandenen hochfrequenten Signale gehen dabei teilweise verloren.

3.1.2 Informationsgehalt in digitalen Ein-Kanal-Bildern

Der Informationsgehalt ist abhängig von der Anzahl der Kanäle (N_{Ch}). Die spektralen Unterschiede der Intensitätsfunktion werden mit nur einem Kanal nicht aufgelöst.

$$N_{\text{Ch}} = 1 \quad (3.4)$$

Die Reduzierung des Informationsgehaltes vom theoretischen Maximum zum tatsächlichen Wert hängt, wie erläutert, von statistischen Abhängigkeiten unter den Grauwerten ab. Wegen der fehlenden spektralen Auflösung ergibt sich die Reduzierung nur aus Abhängigkeiten örtlicher Pixelnachbarschaften. Gerade bei Abbildungen von technischen Objekten kann es zu größeren gleichmäßigen Flächen kommen, also überwiegend niederfrequenten Änderungen der Intensitätsfunktion, was die Abhängigkeiten erhöht und damit den Informationsgehalt senkt. Weil es zusätzlich hohe Ortsfrequenzen gibt und alle Bilder rauschbehaftet sind, ist damit der Informationsgehalt von digitalen Ein-Kanal-Bildern im Verhältnis zum maximal möglichen relativ hoch.

3.1.3 Informationsgehalt in digitalen Mehrkanalbildern

Das theoretische Maximum des Informationsgehaltes von Mehrkanalbildern ist um den Faktor der Anzahl der Kanäle (N_{Ch}) höher als das von Ein-Kanal-Bildern.

$$N_{\text{Ch}} > 1 \quad (3.5)$$

Die zusätzlichen Kanäle bringen in der Regel auch einen höheren Informationsgehalt mit sich. Unter Umständen ist es genau diese zusätzliche Information, mit der die Messaufgabe erst erfolgreich gelöst werden kann. Wenn zum Beispiel zwei Teile, die über große Bereiche ähnliche Reflexionsgrade haben, mit einem panchromatischen System erfasst werden, ist der Kontrast zwischen den beiden sehr schwach. Mit einem Mehrkanalsystem werden in eben den Kanälen, in denen es spektrale Unterschiede gibt, deutlich größere Kontraste zwischen den Objekten erkennbar sein. Die Projektion der unendlich vielen Wellenlängen des Gesamtspektrums auf eine begrenzte Anzahl von Kanälen, im Extremfall auf nur einen Kanal, führt zu einer Integration der spektralen Information zu Intensitätswerten. In um so weniger Kanäle das Spektrum eingeteilt wird, desto mehr Information geht verloren.

In der Praxis steigt der Informationsgehalt aber nicht linear mit der Anzahl der Kanäle, die Erhöhung ist geringer. Wenn ein Objekt in einem der Kanäle hell erscheint, ist es wahrscheinlicher, dass es in einem anderen Kanal auch hell erscheint, als dass es dunkel erscheint. Es gibt Abhängigkeiten zwischen den Wahrscheinlichkeiten der Grauwerte eines Pixels in den verschiedenen Kanälen. Die meisten

Körperfarben entstehen durch selektive Absorption, das daraus resultierende Spektrum ist breitbandig bzw. hat flach ansteigende Spektralkurven [Kle05]. Optische Effekte, die steile Anstiege im Spektrum (z. B. Interferenzen an dünnen Schichten) aufweisen, treten seltener auf. Mit steigender Auflösung des Spektrums (Erhöhung der Kanalanzahl) der Intensitätsfunktion wird immer weniger zusätzliche Information gewonnen.

Trotz dieser Reduzierung durch statistische Abhängigkeiten weisen Mehrkanalbilder einen höheren Informationsgehalt als gleichartige monochrome Bilder auf. Ausnahmen davon sind Bilder, bei denen es keine spektralen Unterschiede der Kanäle gibt. Zum Beispiel Schattenwurfbilder oder monochromatisch beleuchtete Szenen. Für solche Bilder werden für gewöhnlich keine Mehrkanalkameras eingesetzt.

3.1.4 Informationsgehalt in digitalen Bildern von CFA-Sensoren

Kameras mit Color Filter Array mit Anordnung nach Bayer haben nur einen Sensor mit vorgesetztem Filterraster. Wenn sie mit Ein-Kanal-Kameras verglichen werden, stellt sich heraus, dass bei gleicher Sensorgröße beide Bilder aus den Informationen der gleichen Anzahl abgetasteter Pixel bestehen. Das Demosaiking, die Rekonstruktion der vollen Auflösung der Einzelkanäle, stellt keinen Zuwachs an Informationsgehalt dar. Das theoretische Maximum des Informationsgehaltes ist deshalb identisch.

Beispiel: Bei einem Sensor mit SXGA-Auflösung und 256 Graustufen pro Kanal ergibt sich der maximal mögliche Informationsgehalt wie folgt:

$$\begin{aligned} I_{\text{Mono}} &= 8 \text{ bit} \cdot 1280 \cdot 1024 \\ &= 10\,485\,760 \text{ Bit} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{CFA}} &= 8 \text{ bit} \cdot 640 \cdot 512 \\ &\quad + 8 \text{ bit} \cdot 640 \cdot 512 \\ &\quad + 8 \text{ bit} \cdot 640 \cdot 1024 \\ &= 10\,485\,760 \text{ bit} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Der tatsächliche Informationsgehalt der Bilder ist nur dann gleich, wenn der Informationsgehalt im Rohdatenbild des CFA-Sensors gleich dem des Ein-Kanal-Bildes ist. Dadurch, dass direkt benachbarte Pixel hinter verschiedenen Farbfiltern des CFA sitzen, ist zu erwarten, dass die Abhängigkeiten der Grauwerte benachbarter Pixel sich von denen des Bildes eines panchromatischen Sensors unterscheiden. Der andere Filter und damit die andere spektrale Empfindlichkeit des Pixels führt dazu, dass abhängig von dem Spektrum der Intensitätsfunktion auf dem Sensor (z. B. modifiziert durch die Körperfarbe von Objekten) unterschiedliche Signale in

den Pixeln generiert werden. Dieser Effekt sollte bei der Abbildung verschiedenfarbiger Objekte zu einem höheren Informationsgehalt im Rohdatenbild führen. Die Schlussfolgerung daraus wäre, dass ein per Demosaiking rekonstruierter Einzelkanal weniger Informationsgehalt hat als das vergleichbare mit panchromatischem Sensor erzeugte Bild. Die drei rekonstruierten Kanäle tragen aber gemeinsam einen höheren Informationsgehalt.

3.1.5 Zusammenfassung zu Informationen in digitalen Bildern

Es konnte gezeigt werden, dass digitale Mehrkanalbilder mehr Potential haben, nützliche Informationen zu tragen, da sie insgesamt mehr Informationen enthalten als Ein-Kanal-Bilder. Bei Objekten, die über ihre farbliche Erscheinung unterschieden werden können, haben Mehrkanalbilder Vorteile. Es ist mit höherer spektraler Auflösung wahrscheinlicher, dass ein guter Kontrast zwischen den Objekten erzeugt werden kann. In einem Einzelkanal ist die Wahrscheinlichkeit für gute Kontraste geringer, wenn kein Apriori-Wissen über die Objekte existiert.

Die CFA Sensoren stellen einen besonderen Fall dar. Bei ihnen wird örtliche Auflösung gegen spektrale „eingetauscht“. Es ist zu erwarten, dass die Messunsicherheit bei der Messung in nur einem der Kanäle größer wird. Gleichzeitig steigen aber die Chancen für einen guten Objektkontrast bei Nutzung aller Kanäle. Der bessere Kontrast könnte dann trotz geringerer Ortsauflösung zu insgesamt vergleichbaren Messunsicherheiten führen. Des Weiteren können Objekte gemessen werden, die unter Umständen mit Ein-Kanal-Systemen nicht zu messen sind.

3.2 Theoretische Untersuchungen zum Einfluss der Beleuchtung auf die Bilderzeugung von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array

In Unterabschnitt 2.1.8 wurde bereits auf wichtige Eigenschaften der Filter Arrays eingegangen. An dieser Stelle folgen theoretische Betrachtungen zum spektralen Verhalten der Filter in Kombination mit der Empfängersensitivität.

Weder für die spektrale Sensitivität des Matrixempfängers noch für die Transmissionsgrade der Filtermaterialien gibt es Normen. Sie sind hersteller- und gerätespezifisch. Es gibt physikalische Grenzen. Siliziumbasierte Empfänger sind oberhalb von ca. 1100 nm nicht empfindlich, weil die Energie des Photons nicht mehr ausreicht, um Ladungsträger zu generieren. Die Energie eines Photons ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge:

$$e = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (3.8)$$

Auf der anderen Seite des Spektrums gibt es natürliche Grenzen durch die Absorption im Trägermaterial (reines Silizium) und durch Schutzschichten (Siliziumoxid). Je kürzer die Wellenlänge, desto stärker wird das Licht absorbiert, bevor es überhaupt die photoempfindliche Schicht erreichen kann. Deshalb liegt die Grenze bei konventionellen Matrixempfängern bei etwa 300 nm.

Die Werkstoffe der Filter sind gewöhnlich organische Farbstoffe. Ihre Filterwirkung hängt von ihrer Zusammensetzung und ihrer Dicke ab. Üblicherweise haben sie alle relativ hohe Transmissionsgrade oberhalb von 900 nm. Selbst die „blauen“ und „grünen“ Filter werden im nahen Infrarot (NIR) wieder transparent. Da dieser Teil der Sensorsensitivität für Farbbilder keine Bedeutung hat (Analogie zum Menschen), legen die Hersteller der Sensoren nicht viel Wert auf die Filterwirkung außerhalb des für den Menschen sichtbaren Bereiches des elektromagnetischen Spektrums (VIS). In einigen Kameras sind extra IR-Sperrfilter eingebaut. Bei industriellen Kameras ist die Verwendung eines Filters meist dem Anwender überlassen.

Wie aus den Datenblättern üblicher industrieller Kameraempfänger zu erkennen ist, sind die Spektralbereiche der drei Kanäle von CFA-Kameras nicht vollständig getrennt (siehe Abbildung 3.1). Hinzu kommt, dass diese Empfindlichkeitskurven nur Richtwerte sind. Durch die Streuung bei der Herstellung der Empfänger, bei der Mischung der Filterfarbstoffe und bei den Dicken der Filter können nochmals erhebliche Abweichungen von den Spezifikationen im Datenblatt auftreten.

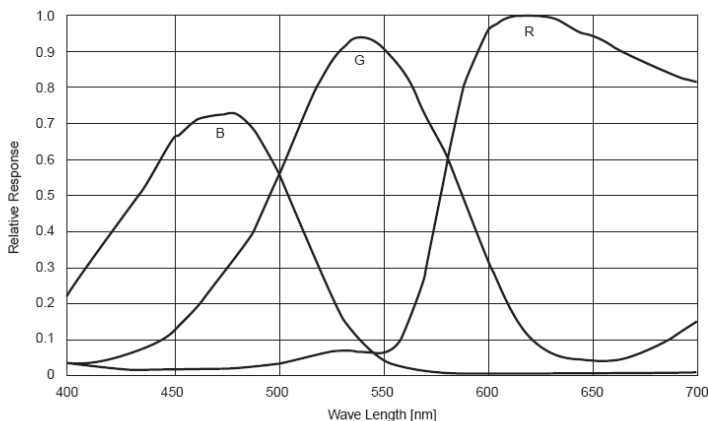


Abbildung 3.1: Spektrale Empfindlichkeit – Beispiel: Sony ICX285AQ

All das führt dazu, dass das Übersprechen der Kanäle bei breitbandiger Beleuchtung sehr schwer vorhersagbar ist. Kanalübersprechen ist aber in den Methoden zur Messung geometrischer Größen nicht berücksichtigt und lässt sich wegen der schlechten Vorhersage auch nicht einfach integrieren (z. B. beim Demosaiking oder bei eventueller Verzeichnungs Korrektur). Die verwendeten Modelle für die Signalaufbereitung und Verarbeitung sind nur zutreffend, solange die Kanäle als

unabhängig betrachtet werden. Deshalb ist es interessant zu untersuchen, wie sich mit angepasster Beleuchtung trotz der Besonderheiten der Empfängercharakteristik gute Kanaltrennung erreichen lässt. Zusätzlich können weitere Verbesserungen erreicht werden, wenn bei der Festlegung der Eigenschaften der Beleuchtung auf die Anforderungen bei der Messung geometrischer Größen geachtet wird.

Um eine Beleuchtung zu schaffen, die vorteilhaft für den Einsatz von CFA-Kameras dieser Anwendung ist, sind folgende Aspekte von Bedeutung:

Steuerbarkeit der Einzelkanäle Damit ist ein beleuchtungsseitiger Abgleich der Helligkeiten der Kanäle möglich. Dadurch wird der Dynamikumfang des Sensors vollständig nutzbar.

Geringes Übersprechen von einem Beleuchtungsspektrum zu fremden Kanälen Gemeint ist damit: Wenn beispielsweise nur der blaue Beleuchtungskanal eingeschaltet wird, soll auch nur der blaue Kanal der Kamera ein Signal liefern. Signale des roten und grünen Kanals bei blauer Beleuchtung sind nicht erwünscht und können zu Messabweichungen führen.

Gute „Farbwiedergabe“ Trotz des Wunsches nach geringem Übersprechen soll die Lichtquelle ein möglichst volles und gleichmäßiges Spektrum aufweisen, um spektrale Unterschiede der Objekte auch gut wiedergeben zu können.

Lichtquelle ermöglicht verschiedene Leuchtenkonstruktionen Geometrische Eigenschaften der Beleuchtung sind von großer Bedeutung (siehe Unterabschnitt 2.1.7). Eigenschaften der Lichtquelle wie abstrahlende Fläche, räumliche Abstrahlcharakteristik, thermische und elektrische Eigenschaften und notwendige Sicherheitsvorkehrungen sollten die Designmöglichkeiten für die Leuchten möglichst wenig einschränken.

Spektrale Leistungshomogenität für die Ausleuchtung der Objektszene Für die Objektszene müssen nicht nur gleiche Helligkeiten über den gesamten Bereich erzeugt werden, sondern das Beleuchtungsspektrum über die gesamte Szene muss annähernd konstant sein.

Theoretisch kann die gewünschte spektrale Charakteristik direkt von den spektralen Empfindlichkeiten der Kameras abgeleitet werden. Das Beleuchtungsspektrum sollte in den Wellenlängen-Bereichen, in denen mehrere Kanäle empfindlich sind, keine nennenswerte Intensität haben. Bei Betrachtung von Abbildung 3.1 wird klar, dass diese Forderung nicht praktikabel ist. Der blaue und der grüne Kanal werden bei dieser Kamera nie vollständig trennbar sein. Die abgeschwächte Formulierung ist: Die Intensitäten des Beleuchtungsspektrums sollten in Bereichen großer Überschneidung der Empfindlichkeitskurven niedrig sein. Auf das Beispiel in Abbildung 3.1 bezogen: Eine Beleuchtung für eine Kamera mit dem Matrixsensor „Sony ICX258AQ“ sollte bei ca. 500 nm und ca. 580 nm geringe Intensitäten in ihrem Spektrum aufweisen.

Kernstück der Beleuchtung ist die Licht- oder Strahlungsquelle. Lichtquellen lassen sich grob in vier Klassen einteilen (siehe Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Ordnung für Lichtquellen [Hen02]

Physikalische Grundlage	Strahlung	Lampenbeispiele
Temperaturstrahler	Kontinuum	Glühlampe, Halogenlampe
Elektrische Entladung in Gasen	Resonanzlinien und Kontinuum	„Xenon-Lampe“ im KFZ, Hochleistungslampen in Projektoren
Strahlungswandlung in Leuchtstoffen	ungleichmäßiges Kontinuum	Leuchtstoffröhren, „weiße“ LED
Lumineszenz im Festkörper	schmalbandiges Kontinuum	LED, Elektrolumineszenzfolien

Das Spektrum der Lichtquelle lässt sich zusätzlich durch die Filterwirkung von Elementen der Leuchte beeinflussen. Das sind spektrale Reflexions- und Transmissionsgrade von verwendeten Werkstoffen und Oberflächen. Für die Untersuchungen im experimentellen Teil dieser Arbeit werden nur Metallschicht-Interferenzfilter zur gezielten Veränderung des Spektrums eingesetzt. Diese sind gegenüber anderen Filtern sehr stabil in ihrer Filterwirkung und relativ unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen.

3.3 Theoretische Untersuchungen zur Rekonstruktion des Mehrkanalbildes aus Rohdaten von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array

Wie in Unterabschnitt 2.1.8 erläutert, erzeugen Kameras mit Farbfilterraster nicht direkt ein Mehrkanalbild. Das Rohdatenbild der Kamera ist nur ein Intensitätsbild. Erst in Kombination mit dem Wissen über die Beschaffenheit und Anordnung des Filterarray lässt sich daraus das gewünschte Mehrkanalbild errechnen. Der Prozess dieser Berechnung wird gewöhnlich als Demosaiking bezeichnet, in Anlehnung an den mosaikartigen Aufbau des Rohdatenbildes. Der häufigste Vertreter von Kameras mit Farbfilterraster weist die sogenannte Bayer-Anordnung [Bay75] der Filter auf. Die Filtereigenschaften sind so gewählt, dass die resultierenden spektralen Empfindlichkeiten ähnlich denen des menschlichen Auges sind (siehe Abbildung 3.2).

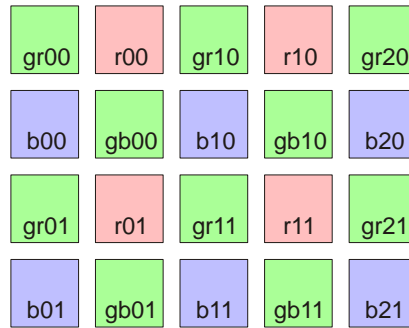


Abbildung 3.2: Filteranordnung nach Bayer

Es gibt eine Vielzahl von Demosaiking-Verfahren für Bayer Pattern CFA-Kameras und es werden ständig neue entwickelt. Das Ziel der Forschung auf diesem Gebiet ist jedoch fast ausschließlich die Erzeugung von Farbbildern, die für den menschlichen Betrachter möglichst natürlich aussehen. Der Grund dafür liegt in der Anwendung in Foto- und Videotechnologien.

Für die Messung geometrischer Größen in digitalen Bildern gibt es andere Prioritäten. Im Folgenden werden die zwei Standard-Demosaiking-Verfahren für industrielle Bildverarbeitung beschrieben. Sie sind in fast jedem Treiber für eine Kamera mit CFA implementiert. Das mit Abstand einfachste Verfahren ist das sogenannte „Nearest Neighbour“-Demosaiking. Dabei werden die Grauwerte für die Lücken im Raster aus ihren nächsten Nachbarn gleicher Farbe kopiert (siehe Abbildung 3.3). Bei dieser gleichverteilten Rasteranordnung ist der nächste Nachbar nicht eindeutig bestimmbar, dafür muss eine Vorschrift in das Verfahren integriert werden (z. B. Vorzugsreihenfolge: links, rechts, ...). Das „Nearest Neighbour“-Demosaiking bedarf eines sehr geringen Rechenaufwandes, die Bilder zeigen aber an Kanten sichtbare Artefakte, die sowohl das Empfinden des Betrachters stören, als auch eine Kantenortsbestimmung beeinträchtigen. Im Allgemeinen ist davon abzuraten, dieses Demosaiking einzusetzen, die einzige Ausnahme wäre, wenn eine aufwändigere Berechnung aus schwerwiegenden Gründen vermieden werden muss.

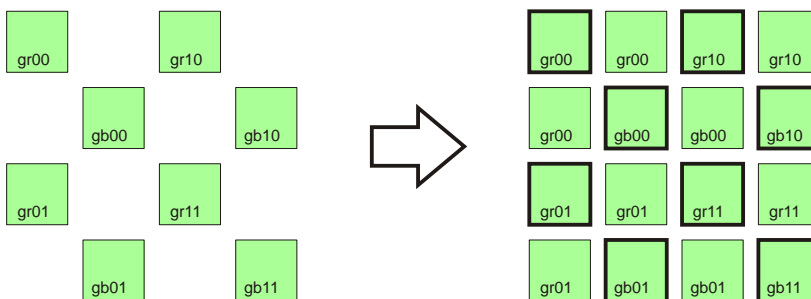


Abbildung 3.3: Demosaiking: Nearest Neighbour

Das zweite Verfahren ist das am häufigsten eingesetzte. Es ist fast immer auch im Treiber von industriellen Kameras zu finden. Es handelt sich um *bilineare Interpolation*. Dabei wird der gesuchte Wert zwischen bekannten Stützstellen auf Basis einer linearen Funktion interpoliert. Durch die äquidistante Verteilung der Pixel bei dem Bayer-Pattern-CFA ergibt sich eine Mittelwertberechnung aus zwei oder vier benachbarten Pixeln (siehe Abbildung 3.4).

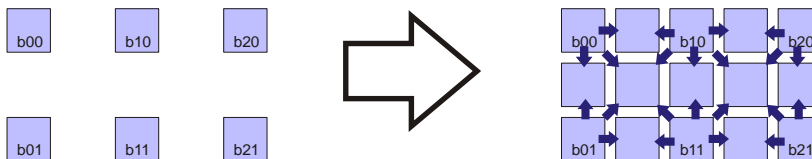


Abbildung 3.4: Demosaiking: Bilineare Interpolation

Auch bei diesem Demosaiking verbleiben sichtbare Artefakte an scharfen Kanten im Bild. Sie sind aber gegenüber dem „Next Neighbour“-Demosaiking deutlich reduziert. Das gleiche gilt für die Abweichungen der Kantenorte im Bild.

Ein weiteres, häufig eingesetztes, Verfahren ist die *bikubische Interpolation*. Sie ist der bilinearen Interpolation sehr ähnlich. Es wird hier von einem Signalverlauf eines Polynoms dritten Grades ausgegangen, deshalb werden für die Interpolation vier oder 16 Nachbapixel berücksichtigt. Statt der Mittelwerte ergibt sich für die äquidistanten Stützstellen eine Koeffizientenmatrix, mit der die bekannten Pixel-Grauwerte gefaltet werden. Die kubische Funktion für die Interpolation vorzugeben, bringt in der Praxis kaum Vorteile, die Ergebnisse der bikubischen Interpolation sind denen der bilinearen Interpolation sehr ähnlich. In beiden Verfahren treten etwa die gleichen Probleme mit Artefakten und Kantenortsabweichungen auf (siehe auch Abschnitt 4.3). Interessant ist die Frage, ob mit einer anderen Modell-Funktion bessere Ergebnisse erzielt werden können. Der Weg über eine Koeffizientenmatrix bzw. eine Matrix mit Wichtungsfaktoren erscheint auf Grund des Musters und der äquidistanten Stützstellen sinnvoll.

In der Arbeit von Schnee [Sch07b] wurde deshalb versucht, einen Rauschunterdrückungsfilter, der an eine Gauß-Funktion angelehnt ist, als Demosaiking einzusetzen. Dabei wurde eine Koeffizientenmatrix mit ganzzahligen Werten für eine 5×5-Pixelnachbarschaft eingesetzt. Die Ergebnisbilder hatten deutlich weniger sichtbare Artefakte. Die Abweichungen bei Messung von Geometrie-Elementen im Bild waren leicht reduziert. Es gab jedoch einen starken Weichzeichnungseffekt, durch den das Bild für den Betrachter unscharf wirkt. Eine 2D-Gauß-Funktion ist prinzipiell als Ansatz geeignet, die Umsetzung war aber noch nicht optimal.

Im Folgenden wird ein neues Demosaiking-Verfahren erläutert, das für die besonderen Ziele der Messung geometrischer Größen konzipiert wurde.

Die grundlegende Idee für das neue Verfahren ist, dass die Beeinflussung der Bildinformationen durch das Verfahren nur Charakteristika aufweisen soll, die auch bei der Erzeugung der Abbildung durch ein reelles optisches System entstehen würden [You97]. Die Eigenschaften der Abbildung einer Objektkante und die Position der Kante im Bild sollen so gering wie möglich beeinflusst werden. Alle drei Kanäle sollen gleich behandelt werden. Das erwünschte Ergebnis des Verfahrens ist ein Mehrkanalbild, in dem möglichst keine Artefakte des Rekonstruktionsprozesses zu finden sind, die bei nachfolgenden Algorithmen zu Abweichungen führen könnten.

Eigenschaften des Bayer Pattern CFA sind: Der blaue und rote Kanal haben gleiche Ortsauflösung aber unterschiedliche Rasterpositionen $(x + 1; y + 1)$. Der grüne Kanal hat eine um den Faktor $\sqrt{2}$ erhöhte Auflösung. Die Richtung des kürzesten Pixelmittenabstands ist im Vergleich zu rot und blau um 45° verdreht. Alle drei Kanäle haben „blinde“ Flecken an den Stellen, an denen die anderen Kanäle abgetastet werden. Viele Demosaiking-Verfahren versuchen nur, diese Lücken zu füllen. Daraus ergibt sich ein Problem: Es wird, abhängig vom Verfahren, Tiefpassfilterung auf diese Pixel angewandt, während die Werte der ursprünglich abgetasteten Pixel des jeweiligen Kanals unverändert bleiben und damit keiner Filterwirkung unterworfen sind. So werden zwei Drittel des Bildes tiefpassgefiltert und ein Drittel nicht. Daraus ergibt sich als erste Festlegung für das neue Verfahren, dass alle Pixel gleich behandelt werden sollen. Die Originalwerte – ein Drittel aller Pixel des neuen Mehrkanalbildes – müssen die gleiche Filterwirkung erfahren wie die rekonstruierten Werte.

Die meisten abbildenden optischen Systeme haben rotationsymmetrische Eigenschaften. Deshalb ist die zweite Festlegung für das neue Verfahren, dass der Bereich, aus dem der Wert für eine „Lücke“ abgeschätzt wird, möglichst kreisförmig sein soll. Um die Tiefpassfilterung und den Berechnungsaufwand gering zu halten, wurde nach Voruntersuchungen die Nachbarschaft, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, festgelegt. Es handelt sich um eine 5×5 Pixel große Maske ohne die äußeren Ecken, mit insgesamt 21 Pixeln.

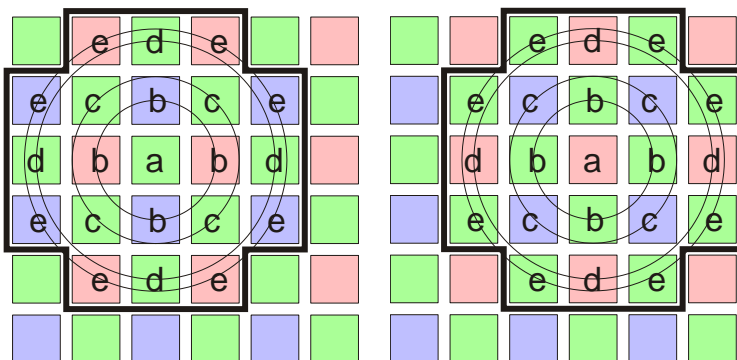


Abbildung 3.5: Pixelnachbarschaft des Verfahrens (Maske)

Für das Rechenverfahren zur Abschätzung der Werte gibt es ebenfalls Festlegungen, die sich aus vorangegangenen Bedingungen für das neue Verfahren ableiten lassen: Es soll keine Interpolation von Werten stattfinden, dass heisst bereits bekannte Pixel dürfen nicht unverändert übernommen werden. Es soll kein adaptives Verfahren angewandt werden, die Werte der vorhandenen Pixel sollen nicht die Rechenvorschrift beeinflussen. Es würde dazu führen, dass der Bildinhalt selbst die Berechnung beeinflusst, die Reproduzierbarkeit (z. B. bei Rauschen) wäre nicht mehr gegeben. Die unumgängliche Weichzeichnung soll alle Kanäle gleichermaßen beeinflussen. Trotz der höheren Auflösung des grünen Kanals soll eine Kante dort nicht „schärfer“ erscheinen als in den anderen beiden Kanälen. Es könnten sonst Probleme bei nachfolgender Kantenortsbestimmung entstehen. Der letzte nicht weniger wichtige Aspekt ist, dass das neue Verfahren nicht viel Rechenaufwand benötigen darf und keine zu großen zeitlichen Verzögerungen mit sich bringen soll. Wirtschaftlichkeit ist wichtig in der industriellen Bildverarbeitung, besondere Anforderungen und damit hohe Kosten bei der Rechentechnik sind nicht erwünscht. All diese Forderungen haben zu einem Verfahren geführt, bei dem eine Approximation der neuen Werte mittels fester Gewichte an den Positionen in der Pixelnachbarschaft erfolgt.

Das feste Rastermaß führt zu konstanten Pixelmittenabständen (a, b, c, d, e), siehe Abbildung 3.5. Deshalb gibt es fünf Gewichte. Als Konsequenz der Filteranordnung ergeben sich feste Beziehungen zwischen den Gewichten, wie sie mit den drei Formeln (3.9), (3.10) und (3.11) beschrieben werden.

$$4 \cdot w(c) = 1 \quad (3.9)$$

$$2 \cdot w(b) + 4 \cdot w(e) = 1 \quad (3.10)$$

$$w(a) + 4 \cdot w(d) = 1 \quad (3.11)$$

Um das Gleichungssystem lösen zu können, fehlen jedoch zwei weitere Gleichungen. Diese werden durch eine Art „Pixelverwaschungsfunktion“ definiert. Wenn die Energie, die unter normalen Bedingungen auf einen Pixel entfällt, durch eine unscharfe Abbildung auf eine gewisse Pixelnachbarschaft entfallen würde, hätte sie eine bestimmte Verteilung. Die Verteilung einer realen Point Spread Function (PSF) sollte als Vorlage dienen. Die PSF einer Optik außerhalb der Fokusebene ist von den spezifischen Eigenschaften des optischen Systems und den Parametern des genutzten Lichtes abhängig. Eine gute Näherung für die Punktverwaschungsfunktion bei inkohärenter Beleuchtung ist eine zweidimensionale radialsymmetrische Gauß-Funktion, siehe Formel (3.12) und Abbildung 3.6.

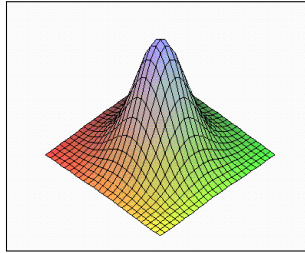


Abbildung 3.6: Graph einer radialsymmetrischen 2D-Gauß-Funktion

$$f(\sigma, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.12)$$

100 % des Volumens unter einer Gauß-Funktion kann nicht über eine begrenzte Fläche gelegt werden. Deshalb wird die Funktion so skaliert, dass 99 % des Volumens über den 21 Pixeln der Maske liegen (entspricht $\sigma = 5/6$). Das Volumen über der Fläche eines Pixels ist repräsentativ dafür, welche Signalstärke bei diesem Pixel durch das einfallende Licht generiert werden würde. Die Verhältnisse der Volumina über den Pixeln entsprechen deshalb den Verhältnissen der Gewichte. Aus der Berechnung ergeben sich die zwei fehlenden Relationen wie folgt:

$$\frac{w(a)}{w(d)} = \frac{w(b)}{w(e)} = 13,0564 \quad (3.13)$$

Damit lässt sich das Gleichungssystem lösen. Die Gewichte sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.2: Gewichte für das neue Verfahren

	r	$w(r)$
a	0	0,765 483
b	1	0,433 582 8
c	$\sqrt{2}$	0,25
d	2	0,058 629 25
e	$\sqrt{5}$	0,033 208 6

Das neue Demosaiking Verfahren wird auf Grund seiner Eigenschaft, dass die Gewichte rotationsymmetrisch um den Zentralpixel verteilt sind, *Circular Homogeneity Approximation (CHA)* genannt. Die Vorteile des CHA Demosaikings gegenüber anderen Demosaiking-Verfahren sollten folgende sein:

- An PSF reeller Optiken angelehnte Pixelnachbarschaft und Gewichtsfunktion führt zu besserer Approximation fehlender Werte.
- Gleichbehandlung aller Kanäle (Pixelnachbarschaft und Gewichtsfunktion) führt zu identischem Rekonstruktionsergebnis in allen Kanälen.
- Unabhängige Bearbeitung der Kanäle verhindert Abweichungen durch Fehleinschätzung der Abhängigkeit der Kanäle und erlaubt kanalweise Anpassung der Kanalinformationen von anderen Softwarekomponenten (z. B. Verzeichnungskorrektur).

Um diese Thesen zu stützen oder sie zu widerlegen, werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Beschreibung und Beurteilung dazu findet sich in Abschnitt 4.3.

3.4 Der Differenzvektor-Kantenfilter

Um in Mehrkanalbildern Kantenkoordinaten zu bestimmen, sind prinzipiell die gleichen Ansätze möglich wie auch in Ein-Kanal-Bildern. Es kann entweder versucht werden, direkt in den Originalbildern mit geeigneten Kriterien Kantenorte zu bestimmen – analog wie in Unterabschnitt 2.2.2 beschrieben –, oder es können vorgeschaltete Methoden angewandt werden, um Kanteninformationen aus dem Bild zu berechnen. Erst auf diesen Kantenbildern werden dann die Orte bestimmt. Für diese Arbeit ist die Entscheidung zu Gunsten der zweiten Möglichkeit gefallen. Es soll zuerst eine geeignete Methode gefunden werden, um Kanteninformationen aus dem Bild zu gewinnen, und ein entsprechender Kantenfilter programmiert werden.

Das hat den Vorteil, dass ein Filter, der auf das gesamte Bild angewendet wird, einfach in vorhandene Bildverarbeitungssoftware integrierbar ist. Eine suchstrahlbasierte Mehrkanalkantenortsbestimmung bedarf bei den meisten Bildverarbeitungsprogrammen architektonischer Änderungen, da die Suchstrahlberechnung nicht für mehrere Grauwertverläufe ausgelegt ist. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist, dass das gesamte Bild oder geschlossene Bildbereiche vollständig gefiltert werden müssen. Das führt zu einem relativ hohen Rechenaufwand.

Es gibt in der klassischen Bildverarbeitung für Grauwertbilder (Ein-Kanal) eine Vielzahl von Möglichkeiten, Kanteninformationen hervorzuheben (siehe auch Unterabschnitt 2.2.1). Diese Filter können nur für einen Grauwertkanal angewandt werden. Bei Mehrkanalbildern ist eine kanalweise Abarbeitung nötig. Das Kantenbild hat also immer noch die gleiche Anzahl von Kanälen. Eine Verrechnung der Kanäle des Kantenbildes zu nur einem Kanal ist möglich, aber nicht explizit Bestandteil des Filterkonzeptes. Deshalb werden dadurch die Unterschiede zwischen den Kanälen nicht gesondert berücksichtigt.

Für diese Arbeit ist das Ziel der Anwendung klar definiert. Im Vordergrund steht die Messung geometrischer Größen in Bildern, die mit Mehrkanalsystemen aufgezeichnet wurden. Es geht nicht um die Interpretation von bestimmten Mischungsverhältnissen der Intensitäten der Einzelkanäle, z. B. als Farbe für den Menschen. Die für Ein-Kanal-Bilder üblichen Verfahren zur Hervorhebung der Kanten sind nicht ohne Weiteres übertragbar. Benötigt wird eine Methode, die auch Unterschiede zwischen den Kanälen berücksichtigt, ohne dass dort durch gegensätzliche Vorzeichen eine Kompensation solcher Unterschiede auftreten kann (Mittelung). Mit Begrifflichkeiten der Farbbildverarbeitung ausgedrückt: Es sollen Farbton-, Farbsättigungs-, und Intensitätskanten gleichermaßen erkannt werden.

Vorgaben für das Design des neuen Kantenfilters sind:

1. *Das Ergebnis des Filters ist ein Bild mit gleicher Auflösung und ähnlicher Größe wie das Original-Mehrkanalbild, aber mit nur einem Kanal, der die Kanteninformation trägt.*
2. *Möglichst geringe Weichzeichnung.* Das bedeutet, dass die Nachbarschaft aus der die Kanteninformation gewonnen wird, klein gehalten werden muss.
3. *Möglichst richtungsunabhängig.* Bedingt durch das feste Pixelraster kann eine absolute Richtungsunabhängigkeit nicht garantiert werden, aber die Form der Pixelnachbarschaft, die betrachtet wird, sollte möglichst kreisförmig sein. Bevorzugung von z. B. Horizontalen gegenüber Diagonalen ist nicht erwünscht.
4. *Jede Art von Unterschied zwischen den Kanälen benachbarter Pixel soll zu einem Kantenwert führen.* Beispielhaft ausgedrückt ist damit gemeint: Wenn entlang einer Pixelreihe die Werte eines Kanals ansteigen, während synchron dazu die Werte eines anderen Kanals absinken, soll dieses Verhalten nicht zu einer Verringerung des Kantenwertes (Kompensation) sondern zu dessen Verstärkung führen.

Der Vorschlag für einen neuen Kantenfilter, der diese Forderungen erfüllen soll, wird im Folgenden beschrieben. Dieser Filter ist an den Roberts-Kantenfilter angelehnt, da dieser bereits die Forderung nach geringer Weichzeichnung erfüllt. Eine Pixelnachbarschaft von weniger als 2×2 zu betrachten, ist nicht sinnvoll. Der Nachteil des Roberts-Kantenfilters, Rauschempfindlichkeit, sollte keine Probleme bereiten, da Bilderfassungshardware für Koordinatenmesstechnik gewöhnlich hohe Signal-Rausch-Verhältnisse liefert. Hinzu kommt, dass bei Kameras mit Bayer-Pattern-CFA bereits ein Vorverarbeitungsschritt erfolgt, der unter anderem auch das Bildrauschen reduziert (Demosaiking). Um horizontale bzw. vertikale sowie diagonale Kanten gleich zu bewerten, werden zusätzliche Berechnungen eingeführt, die bei Roberts nicht vorhanden sind. Für die Unterschiede zwischen den betrachteten Pixeln werden nicht skalare Differenzen gebildet, sondern es wird ein vektorieller Ansatz gewählt.

Der Filter basiert auf dem Konzept aus einem Verfahren zur Kantenortsbestimmung für Farbbilder (Abbildung 3.7) [UB00].

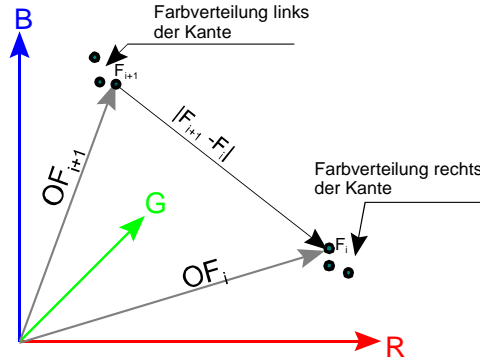


Abbildung 3.7: Betrag des Differenzvektors zweier Pixel [UB00]

Die Kanäle des Bildes werden nicht als Layer verstanden, sondern stattdessen ist jeder Pixel ein Vektor. Jede Komponente des Vektors entspricht dem Intensitätswert in einem der Kanäle. Für den Fall eines RGB-Bildes hat jeder Pixel also einen Drei-Komponenten-Vektor (R,G,B) . Das ganze Bild ist ein diskretes Vektorfeld.

Die Berechnung des Kantenwertes erfolgt aus den Differenzvektoren der 2×2 -Pixelnachbarschaft.

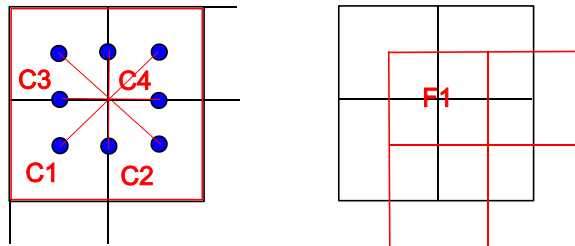


Abbildung 3.8: Differenzvektoren aus einer 2×2 -Pixelnachbarschaft

Für diese vier Pixel werden horizontale (D_h), vertikale (D_v) und diagonale (D_d) Unterschiede errechnet, wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Für den horizontalen Fall werden zunächst jeweils die zwei übereinander liegenden Pixel gemittelt und dann der Differenzvektor gebildet:

$$D_h = \frac{C1 + C3}{2} - \frac{C2 + C4}{2} \quad (3.14)$$

Das gleiche geschieht für die Vertikale:

$$D_v = \frac{C1 + C2}{2} - \frac{C3 + C4}{2} \quad (3.15)$$

Bei den beiden Diagonalen wird die Wichtung um den vergrößerten Pixelmittendenabstand reduziert:

$$D_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(C1 - C4) \quad (3.16)$$

$$D_{d2} = \frac{1}{\sqrt{2}}(C3 - C2) \quad (3.17)$$

Der Kantenwert (K) ist die Summe der Norm der Differenzvektoren bzw. eine dazu proportionale Größe. Da ein Differenzvektor wieder die gleiche Anzahl von Komponenten und damit das Kantenbild die gleiche Anzahl von Kanälen hätte, wird die Norm der Differenzvektoren als skalarer Kantenwert verwendet.

$$K = (\|D_h\| + \|D_v\| + \|D_{d1}\| + \|D_{d2}\|) \quad (3.18)$$

Die Euklidische Vektornorm scheint bei erster Betrachtung die einzige sinnvolle Wahl zu sein, da nur dadurch gewährleistet ist, dass der steilste Kantenanstieg den größten Kantenwert liefert. Für die Berechnung hat sie jedoch einen großen Nachteil, es ist nötig die Wurzel zu ziehen. Als Alternative wurde deshalb die Möglichkeit untersucht, das Quadrat der Euklidischen Norm zu verwenden. Die Wurzel wird dabei nicht gezogen. Der große Vorteil, wie bereits angedeutet, ist eine deutliche Einsparung an Rechenzeit. Der Nachteil ist, dass das Verhalten nicht mehr linear ist. Der Kantenort bleibt aber trotzdem unverändert. Da der Kantenwert eine reine Rechengröße ist und keinerlei Bedeutung für die Auswertung des Bildinhaltes hat, ist diese Abweichung zulässig. Eine andere Vektornorm, wie Betragssummennorm oder Maximumsnorm [Pla04], könnte aber durchaus zu Abweichungen beim Kantenort führen.

Zur Verdeutlichung der Wirkungsweise sind in Abbildung 3.9 ein schwarzes Quadrat auf weißem Grund und daneben das entsprechende gefilterte Kantenbild dargestellt, darunter als weiteres Beispiel ein reales Kamerabild und das entsprechende Kantenbild. Durch die 2×2 -Nachbarschaft ist das Kantenbild um 0,5 Pixel jeweils in X- und Y-Richtung verschoben. Höchste Kantenwerte treten bei stärksten Unterschieden direkt benachbarter Pixel auf. Das entspricht dem theoretischen Verhalten von realen optischen Systemen. Nach Young [You97] ist der Kantenort eines Kantenabbildes bei nicht kohärentem Licht bei 50 % der Intensität zwischen den Objekten. Das ist der Ort des lokalen betragsgrößten Anstieges der Intensitätsfunktion, bzw. der Wendepunkt.

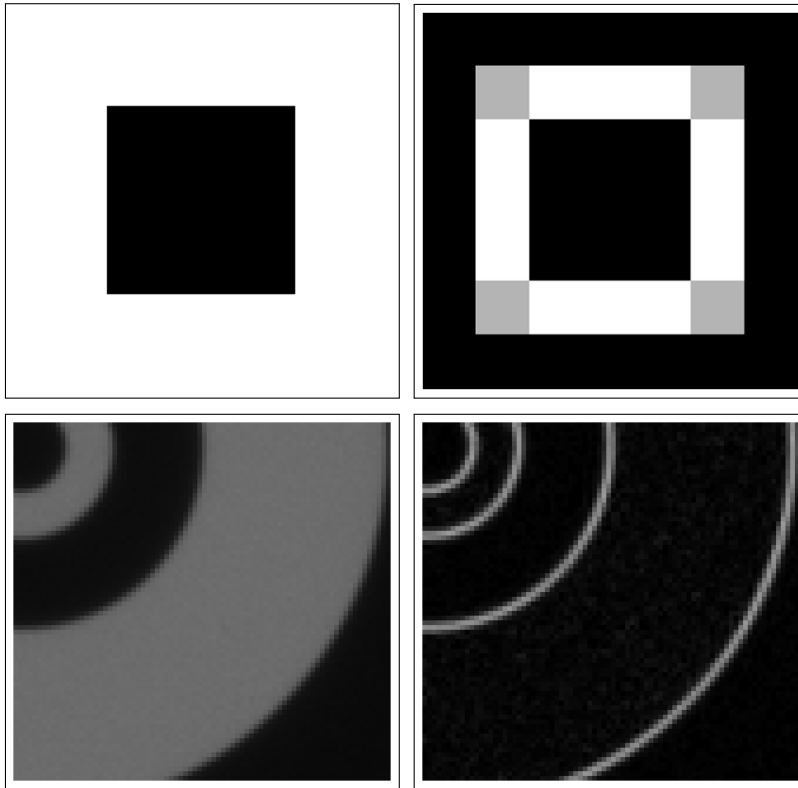
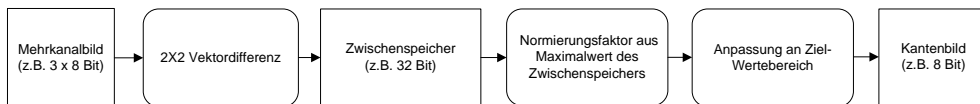


Abbildung 3.9: Theoretisches und praktisches Verhalten des Filters

Wo der tatsächliche Kantenort liegt, hängt davon ab, welches Modell der Abbildung und Abtastung der Abbildung zugrunde gelegt wird. Unter idealen Bedingungen – symmetrische PSF, keine Abbildungsfehler, keine Abtastfehler, alle Kanäle räumlich synchron – liegt die Kante genau an der Stelle des größten Unterschiedes im Originalbild. Im Kantenbild sind die Koordinaten entsprechend verschoben ($x + 0,5$; $y + 0,5$) und es ist der Ort des höchsten Grauwertes.

Der Algorithmus für den Differenzvektor-Kantenfilter arbeitet zweistufig. Der Grund dafür ist nicht die gewählte Vektornorm, sondern ein praktischer Aspekt für den späteren Einsatz des Filters. Viele Bildverarbeitungsalgorithmen sind nur für einen Wertebereich der Graustufen von 8 bit ausgelegt. Eine Skalierung auf diesen Bereich ist nötig, obwohl sie auch zu einer Verringerung der Intensitätsauflösung führt. Wenn die Werte im Kantenbild mittels eines festen Faktors an den Wertebereich des Zielbildes angepasst werden würden, könnten kontrastschwache Originalbilder zu unbrauchbaren Kantenbildern führen. Zusätzlich ist der Algorithmus zur nachfolgenden Kantenortsbestimmung weitaus weniger zuverlässig, wenn völlig unklar ist, in welchem Bereich der Werte die gesuchten Maxima liegen. Deshalb wird der Faktor zur Rückrechnung auf den Wertebereich des Zielbildes für jedes Bild individuell bestimmt. Für das gesamte Bild ist er dann konstant.

**Abbildung 3.10:** Datenfluss Differenzvektor-Kantenfilter

Um dieses Verhalten umsetzen zu können, sollte der Filter zweistufig arbeiten (siehe Abbildung 3.10). Es wird ein Array als Zwischenspeicher in der Größe des Bildes, aber mit höherer Präzision, angelegt (Long, 32 bit-Integer). In diesem Array werden die Kantenwerte nach dem Quadrat der euklidischen Vektornorm abgespeichert. Der Größte vorhandene Kantenwert muss noch in den Wertebereich des Zielbildes passen, deshalb wird damit der Faktor für das gesamte Bild bestimmt. Das nachfolgende Beispiel soll verdeutlichen, was passieren würde, wenn alle Bilder mit gleichem Faktor skaliert würden:

Beispiele:

Bild mit harten Kanten

größter Kantenwert: 400 000

Wertebereich des Zielbildes: 8 bit; 0–255

Faktor: 0,000 637 5

Maximaler Grauwert im Kantenbild: 255

Bild mit „weicheren“ Kanten

größter Kantenwert: 10 000

Nutzung des gleichen Faktors: 0,000 637 5

Maximaler Grauwert im Kantenbild: 6

Bei einem Grauwert von 6 ist eine subpixelgenaue Kantenortsbestimmung nicht mehr sinnvoll. Das erwartete Signal-Rauschverhältnis ist dafür zu gering.

Eine denkbare Variante, um den zeitlichen Verlust zu verringern, wäre, den aktuellen Maximalwert nur zu speichern und den jeweils vorangegangenen für das aktuelle Kantenbild zu nutzen (siehe Abbildung 3.11). Dieses Vorgehen ist aber nur zulässig, wenn davon ausgegangen werden kann, dass es sich um eine Bildserie handelt, bei der die Bildinhalte nicht zu stark abweichen. Es gibt noch keine Implementierung mit diesem Verhalten.

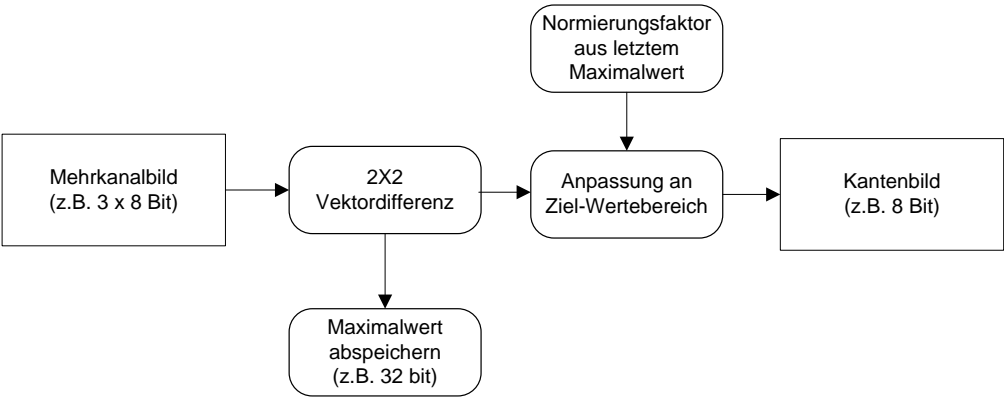


Abbildung 3.11: Alternativer Datenfluss Differenzvektor-Kantenfilter

Wünschenswert wäre, diese Skalierung überhaupt nicht durchführen zu müssen. Es würde sowohl Rechenzeit gespart als auch Verluste bei der Intensitätsauflösung vermieden.

3.5 Kantenortsbestimmung für Differenzvektor-Kantenbilder

Für Kantenortsbestimmung in Ein-Kanal-Bildern gibt es verschiedene Verfahren. Die meisten basieren auf einem eindimensionalen Subpixel-Verfahren. Wie in Unterabschnitt 2.2.2 beschrieben, wird dabei entlang eines Suchstrahls nach der Erfüllung eines bestimmten Kriteriums gesucht. Die gebräuchlichsten Kriterien lassen sich auf die Theorie der Kantenabbildung zurückführen. Danach erfüllt bei konventionellen optischen Systemen der Ort der Kante bei einer Kantenabbildung (nicht kohärent beleuchtet) die Kriterien wie in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Eigenschaften des Kantenabbilds und resultierende Kantenortskriterien

Eigenschaft Kantenabbild	Software-Kriterium
Kantenort ist bei mittlerer Intensität zwischen hellem und dunklem Niveau.	„dynamischer Schwellwert“: Plateaus vor und hinter der Kante werden erkannt, Schwellwert wird die Mitte der Intensitäten
Kantenort ist Ort des lokalen betragsgrößten Anstiegs im Grauwertverlauf quer zur Kante.	„Anstieg“: Ort der größten Differenzen benachbarter Pixel, mit geeigneter Interpolation/Approximation

Auf Mehrkanalbilder ist dieses Vorgehen nicht einfach übertragbar. Es ist vorher nicht bekannt, in welchem der Kanäle die Kante den stärksten Kontrast haben wird, wie steil ihr Anstieg ist oder ob sie überhaupt zu erkennen ist. Deshalb wurde für diese Arbeit ein spezieller Kantenfilter entworfen (siehe Abschnitt 3.4). Das Ergebnis dieses Filters ist ein Kantenbild, bei dem die Grauwerte den Anstieg der Kante repräsentieren. Ein Kriterium wie das des dynamischen Schwellwertes ist nicht mehr verwendbar, da die Information über die Intensität der Plateaus bereits verworfen wurde. Ein Kriterium, das nach großen Differenzen benachbarter Pixel sucht, kann prinzipiell genutzt werden, muss aber an die Eigenheiten des gefilterten Bildes angepasst werden.

Da der Filter bereits Differenzwerte enthält, entspricht der gesuchte Ort im gefilterten Bild nun dem Ort des lokalen Maximums der Grauwerte. Die neue Kantenortsbestimmung mit Subpixelpräzision soll auf einer Reihe von diskreten Grauwerten den Ort des Maximums abschätzen.

Tabelle 3.4: Eigenschaften des gefilterten Kantenabbildes und resultierende Kantenortskriterien

Eigenschaft Kantenabbild im gefilterten Bild	Software-Kriterium
Kantenort ist bei lokalem Maximalwert	Nachbildung der stetigen Funktion, die die Kantenwerte beschreibt, mittels Approximation oder Interpolation aus den bekannten Stützstellen; Bestimmung des Ortes des Maximalwertes

Es wurde drei verschiedene Verfahren untersucht, um von den diskreten Grauwerten des Suchstrahls auf den stetigen Verlauf der Kantenfunktion zu schließen.

1. lokale Approximation mit Polynom vierten Grades
2. lokale Spline-Interpolation mit Polynom dritten Grades
3. lokale Approximation mit einer Gaußfunktion

Ziel dieser Approximation bzw. Interpolation ist nicht den Grauwertverlauf des Suchstrahls möglichst gut wiederzugeben, sondern den Ort des Maximalwertes möglichst gut bestimmen zu können. Lokale Abweichungen des Grauwertes wie auch Unterdrückung hochfrequenter Anteile sind akzeptabel und sogar erwünscht, solange der Ort des Maximums, der den Kantenort repräsentiert, nicht verfälscht wird.

Zur nachfolgenden numerischen Bestimmung des Ortes des Maximalwertes wird ein Nähungsverfahren benötigt. Hierfür wurde das Newtonsche Nähungsverfahren ausgewählt.

3.5.1 Approximation mit Polynom vierten Grades

Die Approximation mittels eines Polynoms vierten Grades bedeutet hier, dass ein Polynom vierten Grades nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate möglichst gut in die diskreten Grauwerte des Suchstrahls eingepasst wird.

Der Polynomgrad wurde so gewählt, dass bei breiten Kantenbildern ein plateauähnlicher Verlauf entstehen könnte. Mit Polynomen niedrigeren Grades lässt sich ein solches Verhalten schlecht bzw. gar nicht abbilden. Ein Polynom höheren Grades neigt stärker zum Schwingen und wird deshalb eher durch Rauschen beeinflusst. Des Weiteren ist die spätere Bestimmung des Ortes des Maximums von Bedeutung. Bei Polynomen höheren Grades ist es nahezu unmöglich, sinnvolle Kriterien zu finden, um entscheiden zu können, welches der Extrema den Kantenort repräsentiert. Selbst bei einem Polynom vierten Grades ist die Festlegung dazu nicht vollständig aus den Eigenschaften des Bildverarbeitungssystems begründbar.

Ein Polynom vierten Grades hat drei Extremstellen. Bei der Bestimmung des Kantenortes muss davon ausgegangen werden, dass das mittlere Extremum dem Ort der Kante entspricht. Es könnte durchaus vorkommen, dass es sich dabei nicht um ein Maximum handelt. Beispielsweise würde bei sehr breiten Kantenübergängen im Originalbild eine Art Plateau im Kantenbild entstehen. Ob dann das mittlere Extremum ein Maximum oder ein Minimum wird, kann durch Rauschen oder eine veränderte Wahl der berücksichtigten Punkte „umschlagen“ (siehe Abbildung 3.12). Es wird angenommen, dass das mittlere Extremum in der Mitte eines Plateaus liegen muss. Es wird unterstellt, dass eine solches Plateau symmetrisch ist. Diese Behauptung lässt sich schlecht aus den Grundlagen, die zu Erzeugung des Kantenbildes geführt haben, belegen. Ohne diese Annahme könnte aber nicht mit Plateaus umgegangen werden.

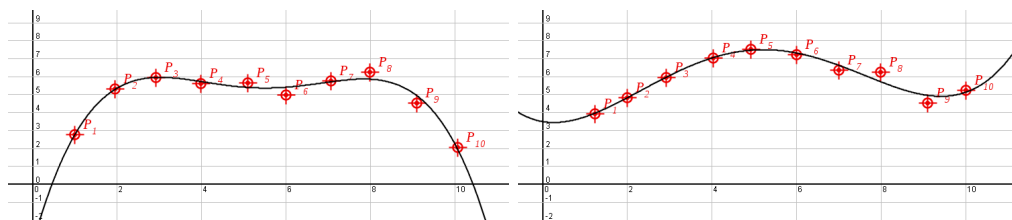


Abbildung 3.12: Simulation einer Approximation mit einem Polynom vierten Grades
[Bon10]

Für die eindeutige Identifikation des mittleren Extremums werden Eigenschaften der Ableitungen geprüft (Vergleiche Abbildung 3.13):

1. *Ist die erste Ableitung gleich Null bzw. erfährt sie einen Vorzeichenwechsel?*
Führt zum Ausschluss von anderen Extrema, sowie von Sattelpunkten.
2. *Besitzt die zweite Ableitung des Polynoms ein globales Minimum bzw. Maximum?*
Verhindert, dass die Ränder des Wertebereichs fälschlicherweise als Extrema interpretiert werden.

Diese Fragen müssen bei der Implementierung des Verfahrens genutzt werden, um das Nähungsverfahren anschließend auf das richtige Extremum anzuwenden.

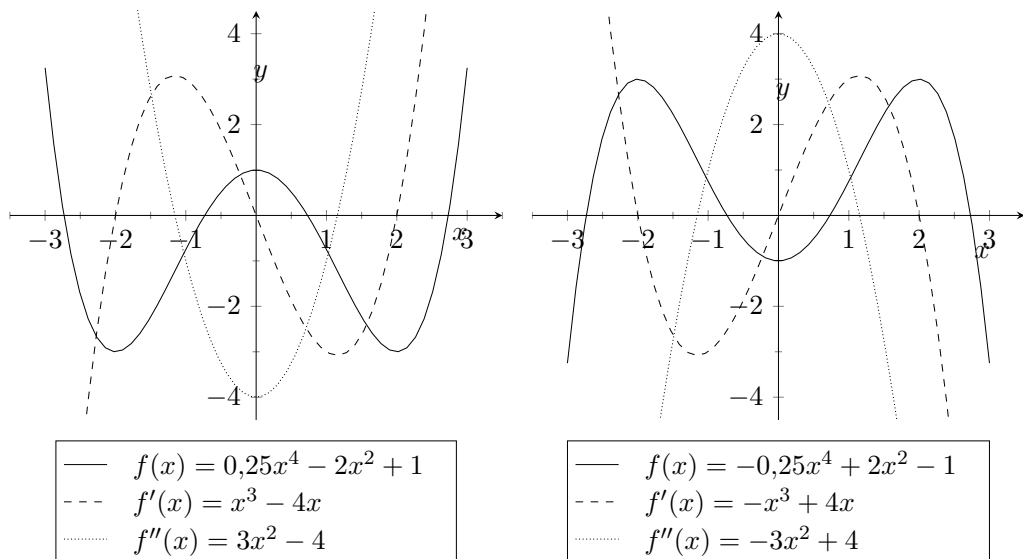


Abbildung 3.13: Graphische Darstellung von Polynomen und deren Ableitungen [Bon10]

3.5.2 Interpolation mit natürlichen kubischen Splines

Die abschnittsweise Interpolation mit Splines hat den Vorteil, dass im Gegensatz zur Interpolation mit Polynomen die resultierenden Funktionen weniger stark zum Schwingen neigen, da sie von niedrigerem Polynomgrad sein können. Der theoretische Nachteil ist, dass die Vorgabe, dass bei Interpolation die Stützstellen exakt getroffen werden müssen, dazu führt, dass Abweichungen durch Rauschen oder andere Bildfehler direkt und in voller Größe auf die angenäherte Funktion Einfluss haben.

Kubische Splines sind Polynome dritten Grades auf einem bestimmten Teilintervall des zu interpolierenden Signals. Die Intervalle sind sehr klein, damit trotz des niedrigen Polynomgrades verschiedenste Signalverläufe nachgebildet werden können.

Für die Übergänge von einem Teilintervall zum nächsten und für die Behandlung äußerer Stützstellen gibt es bestimmte Bedingungen. Diese Bedingungen sind die maßgeblichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Spline-Verfahren.

Für diese Arbeit wurde die Interpolation mit natürlichen Splines gewählt. Der Hauptvorteil ist, dass bei sehr wenigen Stützstellen genug „auswertbare“ Splines für eine Maximumsbestimmung zur Verfügung stehen. Bei sehr schmalen Kanten könnte das Verfahren sonst nicht angewandt werden. Bedingungen dafür werden im Folgenden erläutert. Das Verfahren ist an Neundorf [Neu02] und Engeln-Müllges [EMNW05] angelehnt.

Es seien $n + 1$ Stützpunkte $(x_0|y_0), (x_1|y_1) \dots (x_n|y_n)$ gegeben, wobei $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ gelte.

Das Kurvenstück zwischen zwei benachbarten Stützpunkten wird durch folgendes Polynom beschrieben:

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (3.19)$$

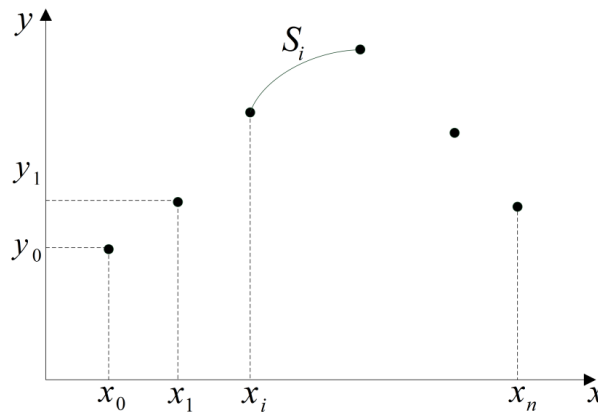


Abbildung 3.14: Spline zwischen zwei Stützpunkten [Bon10]

Es gelten die drei Nebenbedingungen:

1. $S(x)$ ist in jedem Teilintervall $(x_i; x_{i+1})$, $i = 0, 1, \dots, n - 1$ ein Polynom höchstens dritten Grades, $S_i(x)$
2. $S(x), S'(x), S''(x)$ sind stetig in \mathbb{R} , $S(x)$ interpoliert die gesuchte Funktion an den $n + 1$ Stützpunkten x_i .
3. $S(x)$ ist in den Intervallen $(-\infty; x_0)$ und $(x_n; \infty)$ ein Polynom ersten Grades. Das heißt, dass die Krümmung von $S(x)$ an den Stellen x_0 und x_n gleich null ist (natürliche Randbedingungen).

Aus den Bedingungen lässt sich ein Gleichungssystem aufstellen. Für äquidistante Stützpunkte (mit Abstand = 1) wird es vereinfacht zu:

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 4 & 1 & & \vdots \\ 0 & 1 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & 4 & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i \\ b_{i+1} \\ \vdots \\ b_{n-2} \\ b_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}) \\ \vdots \\ 3(y_n - 2y_{n-1} + y_{n-2}) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$a_i = \frac{(b_{i+1} - b_i)}{3} \quad (3.21)$$

$$c_i = (y_{i+1} - y_i) - \frac{(b_{i+1} + 2b_i)}{3} \quad (3.22)$$

Wegen der dritten Nebenbedingung $S''_0(x_0) = S''_n(x_n) = 0$ ergibt sich $b_0 = b_n = 0$.

Als problematisch könnte sich die Spline-Interpolation bei sehr breiten Kantenübergängen erweisen. Im gefilterten Bild würden sie als Plateau erscheinen. Wenn mehrere Punkte zu dem gesuchten Maximum gehören, können schon geringe Schwingungen dazu führen, dass es für das Plateau mehrere Extremstellen gibt. Die Frage nach dem „richtigen“ Maximum lässt sich in diesem Fall kaum beantworten.

3.5.3 Approximation mit Gaußfunktion

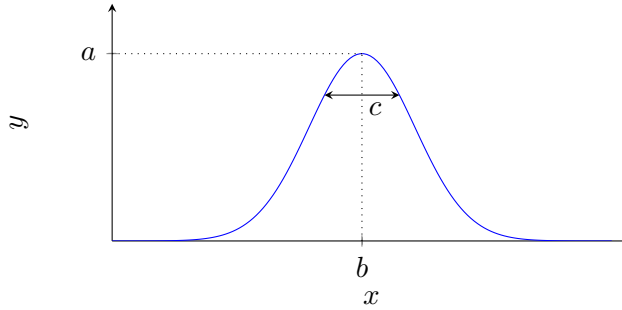
Durch die Wahl der Gauß-Funktion als Funktionsprototyp für die Approximation soll nicht versucht werden, den Grauwertverlauf entlang des Suchstrahls möglichst gut wiederzugeben. Ziel ist es, den Ort des lokalen Maximums zu finden. Auf Grund der Annahme, dass die PSF ähnlich einer Gauß-Funktion ist, sollte nach der Differenzierung der Kantenabbildung durch den Kantenfilter eine ähnliche Charakteristik der Grauwertverteilung an einer Kante im gefilterten Bild zu finden sein. Das Einpassen einer Gauß-Funktion in den Grauwertverlauf des Suchstrahls sollte deshalb gute Ergebnisse für die Bestimmung des Kantenortes liefern.

Das Problem der Approximation einer Gauß-Funktion für diskrete Stützstellen ist nicht ungewöhnlich. Der verbreitetste Ansatz dafür ist, durch Umformung der Funktion das Problem zu einer Polynomapproximation zu verändern [BSMM08].

Es seien $n + 1$ Stützpunkte $(x_0|y_0), (x_1|y_1) \dots (x_n|y_n)$ gegeben, wobei $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ gelte. Eine Funktion der Form

$$f(x) = ae^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2} \quad (3.23)$$

soll möglichst gut an die Stützpunkte angenähert werden.

**Abbildung 3.15:** Gaußfunktion

Anwendung des Logarithmus Naturalis:

$$\begin{aligned}
 \ln[f(x)] &= \ln \left[a e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2} \right] \\
 \ln[f(x)] &= \ln \cdot a - \left(\frac{x-b}{c} \right)^2 \\
 \ln[f(x)] &= -\left(\frac{x}{c} \right)^2 + \left(\frac{2bx}{c^2} \right) - \left[\left(\frac{b}{c} \right)^2 - \ln \cdot a \right] \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

Substitution:

$$\begin{aligned}
 a_2 &= c^{-2} \\
 a_1 &= 2bc^{-2} \\
 a_0 &= \left[\left(\frac{b}{c} \right)^2 - \ln \cdot a \right] \\
 \ln[f(x)] &= -a_2 x^2 + a_1 x - a_0 \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

So kann das Problem wie eine Polynomapproximation behandelt werden. Zu beachten ist: $f(x) \in (0; \infty)$.

Für die Bestimmung des Ortes des Maximums genügt dann:

$$b = \frac{-a_1}{2a_2} \quad (3.26)$$

3.5.4 Näherungsverfahren für die Approximation

Sowohl für die Approximation mit dem Polynom vierten Grades als auch für die Approximation mittels Gauß-Funktion wird ein geeignetes Näherungsverfahren benötigt. Die Wahl fiel auf die „Methode der kleinsten Fehlerquadrate“. Es ist ein Standardverfahren. In der Regel wird Funktionsapproximation über die Minimierung der quadratischen Abweichungen gelöst. Des Weiteren existieren dafür bereits

fertige Funktionen in der Softwarebibliothek, die für die Beispielimplementierung verwendet wird. Beschreibungen für das Verfahren finden sich in häufig in der entsprechenden Literatur, z. B. in [Neu02] oder [EMNW05].

Es seien $n + 1$ Stützpunkte $(x_0|y_0), (x_1|y_1) \dots (x_n|y_n)$ gegeben, wobei $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ gilt. Gesucht werden die $m + 1$ freien Parameter a_k einer Approximationsfunktion:

$$\Phi(x_i, a_0, \dots, a_m) = \sum_{k=0}^m a_k \phi_k(x_i) \quad (3.27)$$

Für eine sinnvolle Approximation ist eine geeignete Wahl des Funktionssystems $\phi_k(x)$ wichtig. Wenn zum Beispiel in eine Punktwolke eines Kreises eine Gerade gelegt werden soll, kann kein brauchbares Ergebnis erwartet werden. Durch die Minimierung der Summe der Quadrate der Abweichungen werden die Parameter a_k bestimmt.

$$F(a_0, \dots, a_m) = \sum_{k=0}^m (y_i - \Phi(x_i, a_0, \dots, a_m))^2 \rightarrow \min \quad (3.28)$$

3.5.5 Numerische Bestimmung des Maximums

Die Schätzung einer passenden Funktion für den diskreten Grauwertverlauf des Suchstrahls allein ist nicht ausreichend. Das Ziel ist die Bestimmung des Kantenortes. Wie die theoretischen Untersuchungen zum Kantenfilter (Abschnitt 3.5) gezeigt haben, entspricht der Kantenort wahrscheinlich dem Ort des maximalen Grauwertes. Es muss also für die Funktion der Ort des lokalen Maximums bestimmt werden. Bei der Gauß-Funktion lässt er sich direkt aus den Parametern berechnen. Bei den Polynomen ist ein numerisches Näherungsverfahren geeignet, um die Nullstelle der ersten Ableitung zu finden. Hierfür wird wiederum ein Standardverfahren genutzt: das *Newtonsche Näherungsverfahren*.

Es wird die Nullstelle ϵ der im Intervall $[a, b]$ stetig differenzierbaren Funktion $f(x)$ gesucht, $f(\epsilon) = 0$. Die verbesserte Näherung der Nullstelle ergibt sich durch den Schnittpunkt x_2 der Abszisse mit der Geraden, die f an der Stelle x_1 tangiert (siehe Abbildung 3.16).

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad (3.29)$$

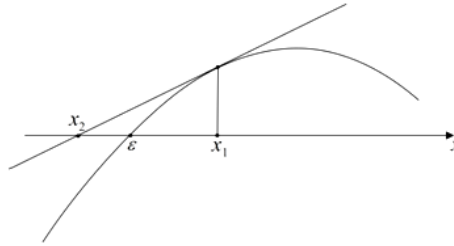


Abbildung 3.16: Newtonsches Näherungsverfahren

Andere Näherungsverfahren sind denkbar, aber aus folgenden Gründen wird das Newton-Verfahren bevorzugt:

- Es handelt sich bei der Implementierung um ein „proof of concept“. Maximale Effizienz ist nicht das primäre Ziel.
- Es soll für alle neuen Kantenortskriterien das gleiche Näherungsverfahren eingesetzt werden, damit die Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Viele effizientere Verfahren können in bestimmten Situationen versagen. Beispielsweise konvergieren Einschlussverfahren nicht, wenn es sich um einen Sattelpunkt, statt um ein Minimum oder ein Maximum handelt [Bon10].
- In der Software-Bibliothek, die für die Beispielimplementierung genutzt werden soll, sind bereits Funktionen zum Newtonschen Näherungsverfahren enthalten.

Für die experimentellen Untersuchungen wird das Newtonsche Näherungsverfahren für subpixelgenaue Bestimmung des Ortes des lokalen Maximums für die Verfahren *Interpolation mit kubischen Splines* und für *Approximation mit Polynomen vierten Grades* genutzt.

4 Experimentelle Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in digitalen Mehrkanalbildern

4.1 Hard- und Software für experimentelle subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in Mehrkanalbildern

Eine besondere Herausforderung für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit ist, dass die verschiedenen neuen Komponenten einzeln nur indirekt überprüfbar sind. Das gilt für den neuen Differenzvektor-Kantenfilter, die neuen Verfahren zur Kantenortsbestimmung und das neue CHA Demosaiking-Verfahren. Ohne erprobte und zuverlässige Algorithmen zur Kantenortsbestimmung in Mehrkanalbildern kann ein neuer Kantenfilter schlecht auf Abweichungen der Kantenposition getestet werden. Gleichzeitig können neue Kantenortskriterien für diesen Kantenfilter nicht erprobt werden, solange unklar ist, ob die Kantenposition durch den Filter beeinflusst wird. Deshalb wurden die Versuche so angelegt, dass einerseits einzelne Eigenschaften bewertet werden können und andererseits alle Komponenten im Zusammenspiel mit gut erprobter Grauwertbildverarbeitung verglichen werden können.

So wird zum Beispiel in den konvertierten Kantenbildern nur in den Einzelkanälen gemessen. Beim Demosaiking werden subjektive Betrachtungen durchgeführt und synthetische Bilder ausgewertet. Bei Untersuchungen zur Beleuchtung wird die Kantenposition nicht betrachtet, sondern es werden nur Eigenschaften des Bildes insgesamt begutachtet.

4.1.1 Hardware für experimentelle subpixelgenaue Kantenortsbestimmung

Für die Aufnahmen mit reellen Kamerabildern wird ein stabiler Stativaufbau eingesetzt. Dort kommen die unterschiedlichen Kameras, das Objektiv, die Beleuchtungen und die Messobjekte zum Einsatz. Bei den Kameras handelt es sich um ein Paar industrieller Kameras mit der Besonderheit, dass sie bis auf eine Ausnahme identisch sind: Die eingesetzte CCD-Matrix einer Kamera hat ein aufgesetztes CFA, während die andere ohne solche Filter verbaut wurde.

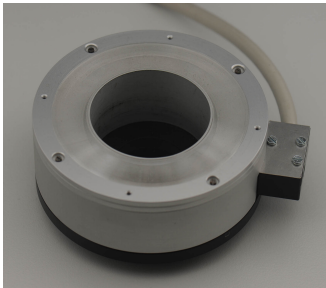
- ABS Jena GmbH: UK1158-C
- ABS Jena GmbH: UK1158-M

Das Objektiv ist ein spezielles Messobjektiv für höchste Ansprüche bei industrieller Bildverarbeitung. Es hat enge Toleranzen bei den Abbildungsfehlern, besonders bei der Verzeichnung. Zudem weist es bild- und objektseitig telezentrische Strahlengänge auf, was Abweichungen durch veränderten Objektstand vorbeugt und auch Probleme mit schräg einfallendem Licht auf den Sensor vermeidet.

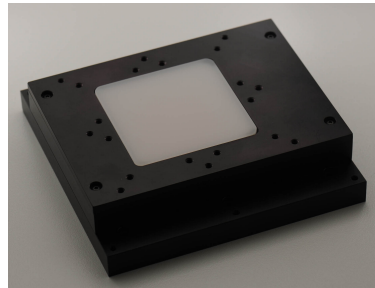
- Carl Zeiss AG: VisionMes 11/11/0.02

Die eingesetzten Auflicht- und Durchlicht-Beleuchtungen wurden speziell für die Versuche konzipiert. Sie sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Ein Vergleich mit anderen Beleuchtungen wird in Kapitel Abschnitt 4.2 genauer beschrieben. Die Besonderheiten der Leuchten sind das gute Zusammenspiel mit den Filtern des CFA und die Steuerbarkeit der Einzelkanäle der verschiedenen Beleuchtungsspektren Rot, Grün und Blau. Sie sind mit Leuchtdioden der Firma Osram bestückt.

- OSRAM GmbH: Multiled LRTB G6TG



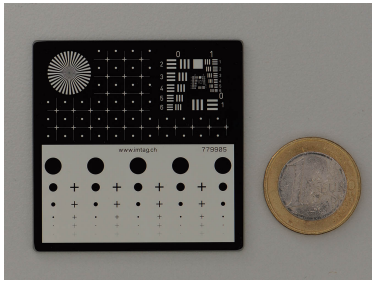
(a) Auflichtbeleuchtung



(b) Durchlichtbeleuchtung

Abbildung 4.1: RGB-LED-Beleuchtungen

Als Messobjekte kommen verschiedene Auflicht- und Durchlicht-Objekte zum Einsatz. Bei den Durchlicht-Objekten handelt es sich um hochpräzise spiegelnde Chromstrukturen auf transparenten Glassubstraten (Abbildung 4.3). Die Auflichtobjekte bestehen ebenfalls aus einem Glassubstrat, es ist jedoch eine mattweiße Grundierung aufgebracht, auf der sich mattschwarze Chromstrukturen befinden (Abbildung 4.2). Zum Vergleich liegt jeweils neben dem Objekt eine Ein-Euro-Münze im Foto.

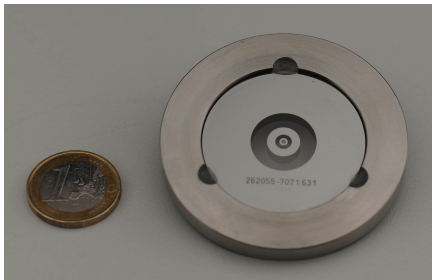


(a)

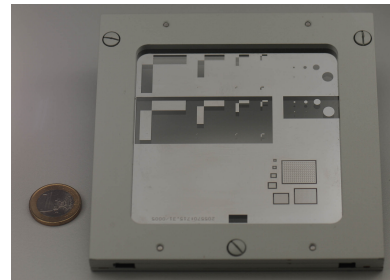


(b)

Abbildung 4.2: Aufsicht-Messobjekte



(a)



(b)

Abbildung 4.3: Durchlicht-Messobjekte

4.1.2 Synthetische Bilder für die experimentelle subpixelgenaue Kantenortsbestimmung

Die synthetischen Bilder werden so erzeugt, wie sich ein Modellkamerasystem zusammen mit einer Modell-Objektszene verhält. Das Modell einer scharfen Kante an einem Objekt entspricht einem Sprung in der Intensitätsfunktion des Objektes (I_{Obj}). Die Intensitätsfunktion des Objektes wird mit einer PSF gefaltet. So entsteht die Intensitätsfunktion der Abbildung. Damit die Faltung berechenbar ist, wird sie durch numerische Integration mit sehr kleinen Intervallen ersetzt. Die Simulation der Abtastung der Abbildung durch den Sensor wird durch numerische Integrationen der Bildintensitätsfunktion über die Fläche des jeweiligen Pixels durchgeführt.

$$I_{\text{Bild}}(x, y) = \int_{-5\sigma}^{5\sigma} \int_{-5\sigma}^{5\sigma} I_{\text{Obj}}(x - \alpha, y - \beta) \cdot \text{PSF}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (4.1)$$

$$I_{\text{Pixel}}(i, j) = \int_0^1 \int_0^1 I_{\text{Bild}}(i + \gamma, j + \delta) d\gamma d\delta \quad (4.2)$$

I_{Obj} – Objektintensitätsfunktion

I_{Bild} – Bildintensitätsfunktion

PSF – Punktverwaschungsfunktion

Der Algorithmus für die Erzeugung der synthetischen Bilder ist in der Programmiersprache C# geschrieben. Zu variieren sind bei der Objektintensitätsfunktion:

- die Grauwerte der Kanäle der beiden Objektflächen (die Kante ist der Übergang von einer zur anderen Fläche)
- die Lage des Mittelpunktes der Kante
- der Verdrehwinkel der Kante um den Mittelpunkt

Als PSF können verschiedene Funktionen angewendet werden. Die aktuelle Implementierung verwendet eine 2D-Gauß-Funktion mit dem Parameter σ (in Pixel):

$$\text{PSF}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (4.3)$$

Für das resultierende digitale Bild gibt es folgende Parameter:

- Länge und Breite (in Pixel)
- Anzahl der Kanäle

4.1.3 Grundlage für Implementierungsarbeiten mit der Softwarebibliothek QID

Es gibt eine Vielzahl von Bildverarbeitungs-Softwarepaketen. Viele Hersteller von KMGs entwickeln eigenständige Software für die Bildverarbeitung, andere nutzen zugekaufte Bibliotheken. Viele davon sind nicht zugänglich. Bei einigen Bibliotheken können die Module gegen Lizenzgebühren genutzt werden. Der Einblick in den Quellcode ist fast immer ausgeschlossen.

Die Implementierungen dieser Arbeit basieren auf der Quick-Image-Development-Bibliothek[Ste09] des Steinbeis Transferzentrum für Bildverarbeitung und Qualitätssicherung Ilmenau. Der Hersteller dieser Software hat für Zwecke der Forschung im Rahmen dieser Arbeit den Quellcode zur Verfügung gestellt. Für einige der behandelten Problemstellungen war das Voraussetzung.

Es gibt in der QID verschiedene Module zu Bildeinzug, Bildvorverarbeitung, Kantenortsbestimmung und Geometrieberechnung aus Punktwolken.

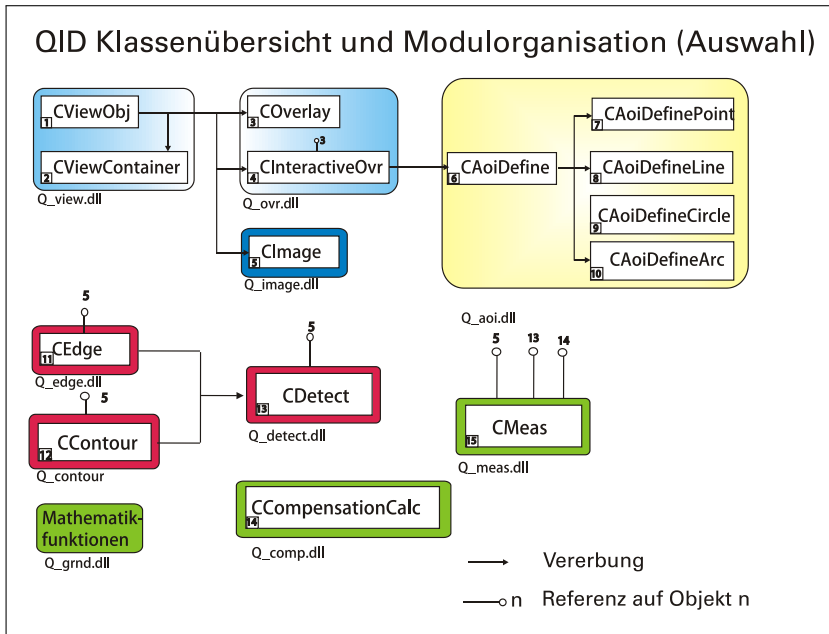


Abbildung 4.4: QID Klassenübersicht und Modulorganisation (Auswahl)[Lin08]

Ein Vorteil beim Bildeinzug ist das relativ flexible Layermodell. Es wird nicht in Grauwertbilder und Farbbilder kategorisiert, sondern es werden mehrere Layer für jedes Bild zur Verfügung gestellt (Begrenzung auf zehn, Stand QID 7.07). Obwohl noch nicht alle Bildzugriffsfunktionen optimal mit erhöhter Anzahl von Layern umgehen können, ist dieses Speichermodell für die Mehrkanalbildverarbeitung von Vorteil. Es sind zudem für die Zukunft Architekturänderungen geplant, die diese hohe Flexibilität weiter verbessern. Dazu gehören neue Speicherarchitekturen ohne Layeranzahl-Begrenzung und multiple Bit-Tiefen-Optionen.

Für die Bildvorverarbeitung gibt es ein Datenstrom-Modell, bei dem sogenannte „Image-Prozessoren“ eingehängt werden können. Ein- und Ausgangsschnittstellen sind flexibel genug, um neue Mehrkanalbildverarbeitung einzubinden.

Bei der Kantenortsbestimmung ist die QID, wie andere Programmpakete auch, zurzeit auf reine Grauwertauswertung ausgelegt. Die zugrunde liegenden mathematischen Operationen können jedoch teilweise bei Mehrkanalproblemen genutzt werden, wie z. B. das Lösen von Gleichungssystemen. Der zur Verfügung gestellte Quellcode ermöglicht Einblick in die verwendeten Algorithmen und erleichtert damit die Implementierung der neuen Verfahren.

4.2 Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Beleuchtung auf die Bilderzeugung von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array

Die theoretischen Betrachtungen zu den Lichtquellen in Abschnitt 4.2 zeigen, dass es eine schwer überschaubare Vielfalt von Möglichkeiten gibt. Um elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums zu erzeugen, gibt es verschiedenste technische Lösungen. Die praktischen Untersuchungen in diesem Kapitel sind auf Varianten beschränkt, die relevant für den Einsatz im industriellen Umfeld sind, speziell in der Fertigungsmesstechnik. Deshalb kommen nur Lichtquellen in Frage, aus denen sich nach dem aktuellen Stand der Technik preiswerte, robuste und geometrisch angepasste Leuchten aufbauen lassen. Eine weitere Vorgabe ist, dass die drei Kanäle, die durch eine Bayer-Pattern-CFA-Kamera unterschieden werden, auch bei der Lichtquelle getrennte Spektralbereiche sind. Ziel ist es, herauszufinden, welche Kombination von Beleuchtung und Kamera die beste Unabhängigkeit der Kanäle gewährleistet.

Es werden zwei verschiedene Systeme für den Aufbau der Lichtquelle in jeweils zwei Varianten untersucht. Der erste Aufbau ist ein externer Kaltlichtgenerator, dessen emittiertes breitbandiges Licht mit Filtern verändert wird. Der zweite Aufbau ist eine Leuchte mit Leuchtdioden als integrierte Lichtquelle.

Folgende Varianten werden getestet:

- Breitbandlichtquelle in Kombination mit Breitband-Metallschicht-Interferenzfiltern
- Breitbandlichtquelle in Kombination mit Schmalband-Metallschicht-Interferenzfiltern
- Anorganische RGB-Leuchtdioden – drei Chips in einem Gehäuse
- Anorganische RGB-Leuchtdioden – einzelne Bauelemente mit ausgewählten Wellenlängen

Der direkte Einsatz einer Breitbandlichtquelle ohne weitere Modifikationen lässt ein starkes Übersprechen der Kanäle erwarten (siehe Abbildung 3.1) und ist nicht empfehlenswert.

4.2.1 Breitbandlichtquelle in Kombination mit Breitband-Metallschicht-Interferenzfiltern

Der erste Versuch soll zeigen, wie sich eine Kamera mit Bayer Pattern CFA in Zusammenspiel mit relativ breitbandigen Lichtquellen verhält. Filter auf Basis von Metallschichtinterferentechnologie können sehr steile Flanken und sehr gutes

Transmissions- und Reflexionsverhalten aufweisen. Es ist möglich, fast beliebige spektrale Filtercharakteristiken zu erzeugen. Standardtypen wie Band-, Short- oder Longpass-Filter sind in vielen Ausführungen relativ preiswert erhältlich. Für diesen Versuch wird ein Set aus drei Filtern genutzt (siehe Abbildung 4.5). Das Set soll einen Filter simulieren, bei dem aus dem VIS-Gesamtspektrum nur die Bereiche blockiert werden, bei denen das Übersprechen des Sensors besonders groß ist. Bei den Herstellerangaben scheint es praktisch keine Lücke zwischen blau und grün zu geben.

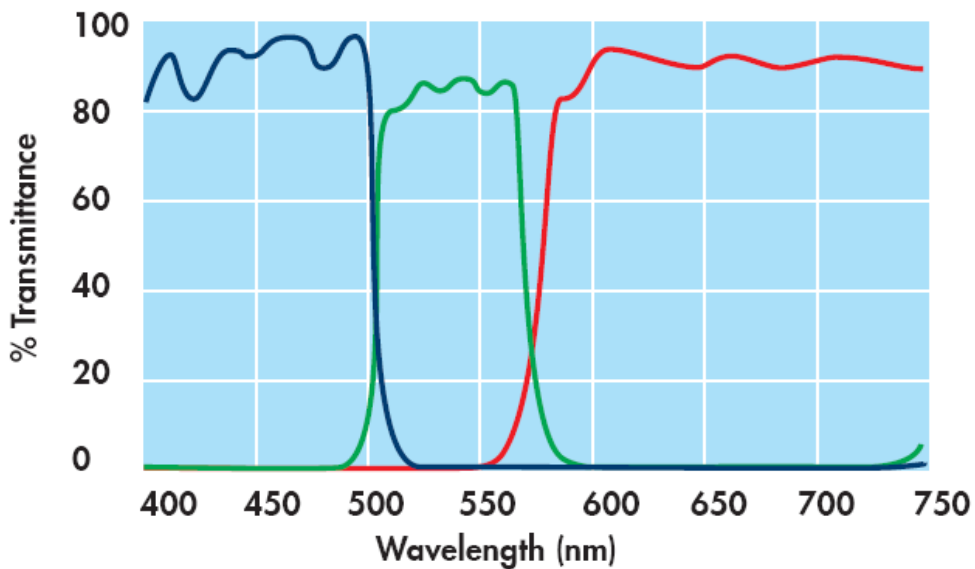


Abbildung 4.5: Spektrale Transmissionsgrade Breitbandfilter (Herstellerangabe) [LOT09]

Bei eigenen spektrometrischen Messungen hat sich jedoch gezeigt, dass es Abweichungen von den Herstellerangaben gibt (siehe Abbildung 4.6).

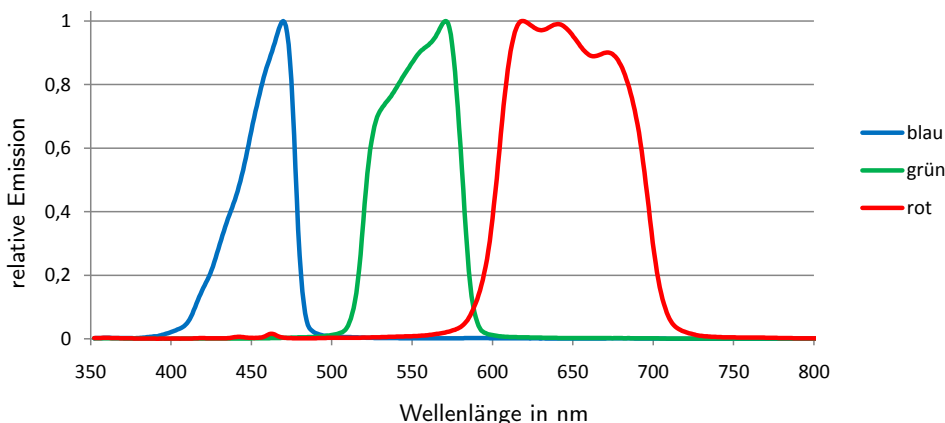


Abbildung 4.6: Relative spektrale Transmission der Breitbandfilter (gemessen)

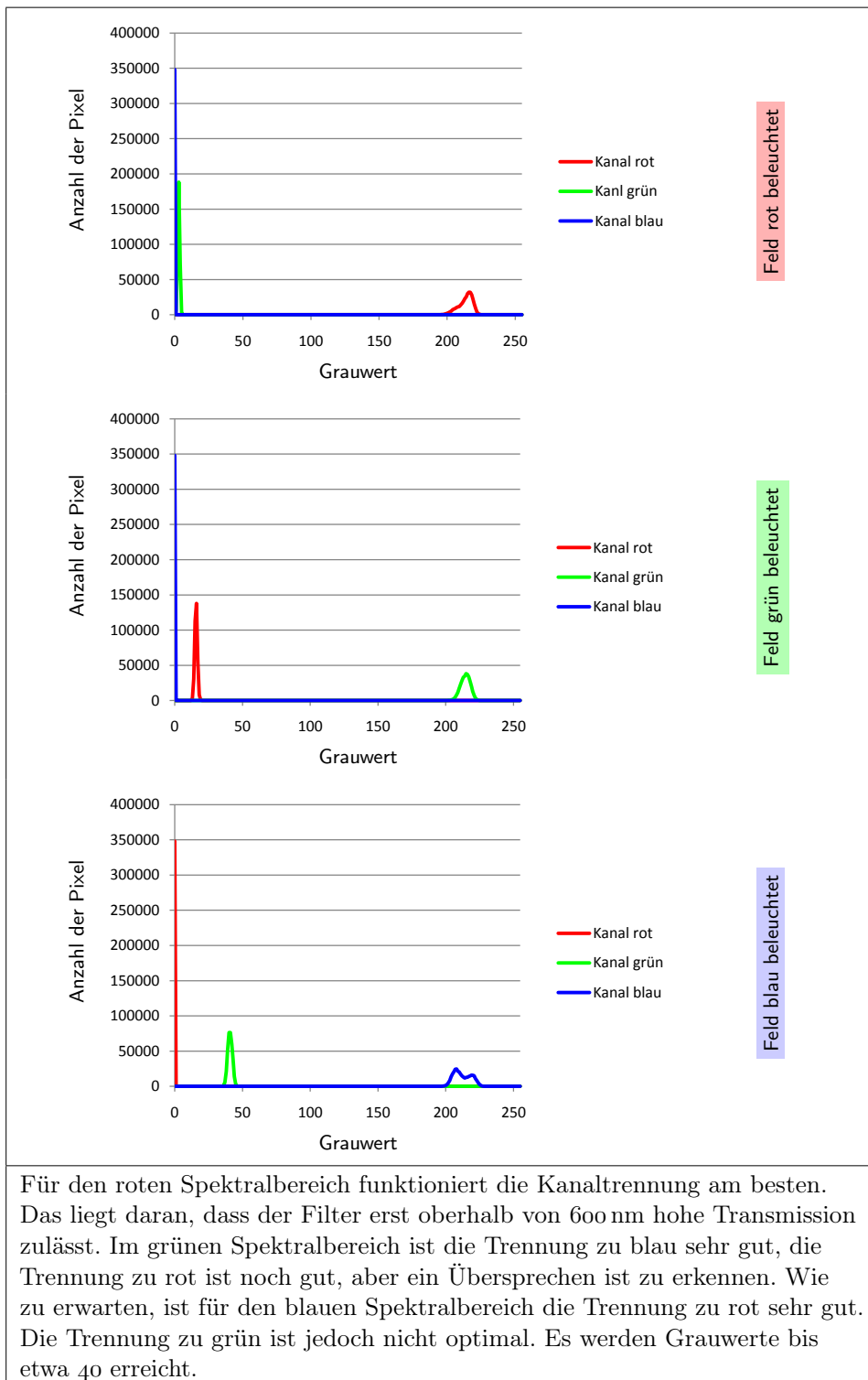
Das Diagramm zeigt die relative Emission der Filter zusammen mit einer Halogenlichtquelle. Die Lücken zwischen den Spektren der Kanäle sind größer als erwartet. Dem entsprechend ist das Filterset gut für den Test geeignet. Zu bedenken ist jedoch, dass ein einzelner Filter, der diese Eigenschaften hat, bisher kein Serienprodukt ist. Er müsste angefertigt werden.

Verwendete Geräte:

- Lichtquelle: 150-Watt-Halogenlampe
- Lichtgenerator: Polytec 20751.20 (mit IR-Sperrfilter ab ca. 700 nm)
- Lichttisch: Fostec A08920 (Faserquerschnittswandler mit Mattscheibe und 51×51 mm Leuchtfläche)
- Filtersatz: LOT Oriel Color Additiv Set (126FA44-50S)

Zur Beurteilung der Ergebnisse werden die Histogramme der Einzelkanäle begutachtet. Der Maximalwert, der bei der Häufigkeit erreicht werden kann, ist 348 160, er entspricht $\frac{1}{4}$ der Gesamtpixelanzahl der Sensor-Matrix (1360×1024). Die Anzahl der Pixel mit grünem Filter ist doppelt so hoch wie die der anderen Filter. Zur Normierung wurden deshalb die Werte des Histogramms des grünen Kanals halbiert. Idealerweise sollten bei grüner Beleuchtung nur die Pixel der Kamera ein Signal liefern, die mit grünen Filtern bestückt sind. Die zwei anderen Kanäle sollten maximale Häufigkeit für den Grauwert null aufweisen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Histogramme der Einzelkanäle bei Breitbandfiltern



4.2.2 Breitbandlichtquelle in Kombination mit Schmalband-Metallschicht-Interferenzfiltern

Auf Basis der Metallschichtinterferentechnologie lassen sich nicht nur die in Unterabschnitt 4.2.1 verwendeten Breitbandfilter erzeugen, sondern auch sehr schmalbandige Bandpassfilter aufbauen. Sie sind sehr gut geeignet, um nur schmale Spektralbereiche einer breitbandigen Lichtquelle zur Beleuchtung zu verwenden. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Experimenten mit so erzeugten schmalen Spektren in Kombination mit einer CFA-Kamera erläutert. Abbildung 4.7 zeigt die gemessenen relativen Transmissionsgrade der verwendeten Filter.

Verwendete Geräte:

- Lichtquelle: 150-Watt-Halogenlampe
- Lichtgenerator: Polytec 20751.20 (mit IR-Sperrfilter ab ca. 700 nm)
- Lichttisch: Fostec A08920 (Faserquerschnittswandler mit Mattscheibe und 51×51 mm Leuchtfläche)
- Filtersatz: schmalbandige Bandpass-Filter; Hersteller: VEB Carl Zeiss Jena

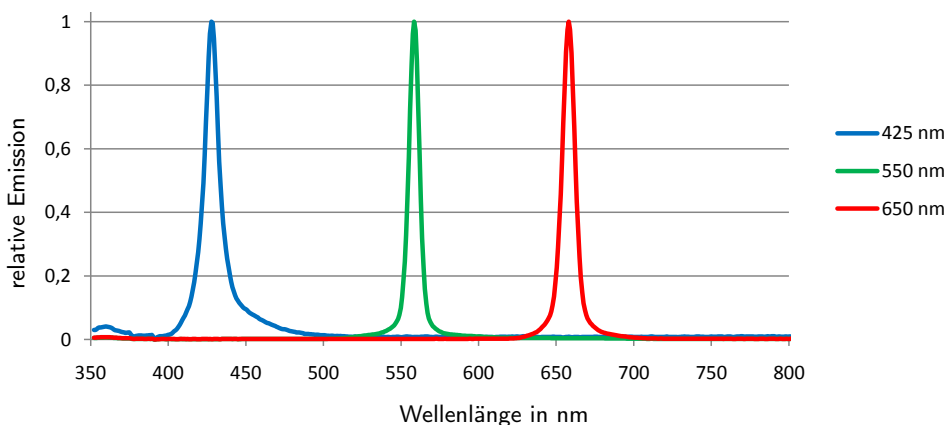
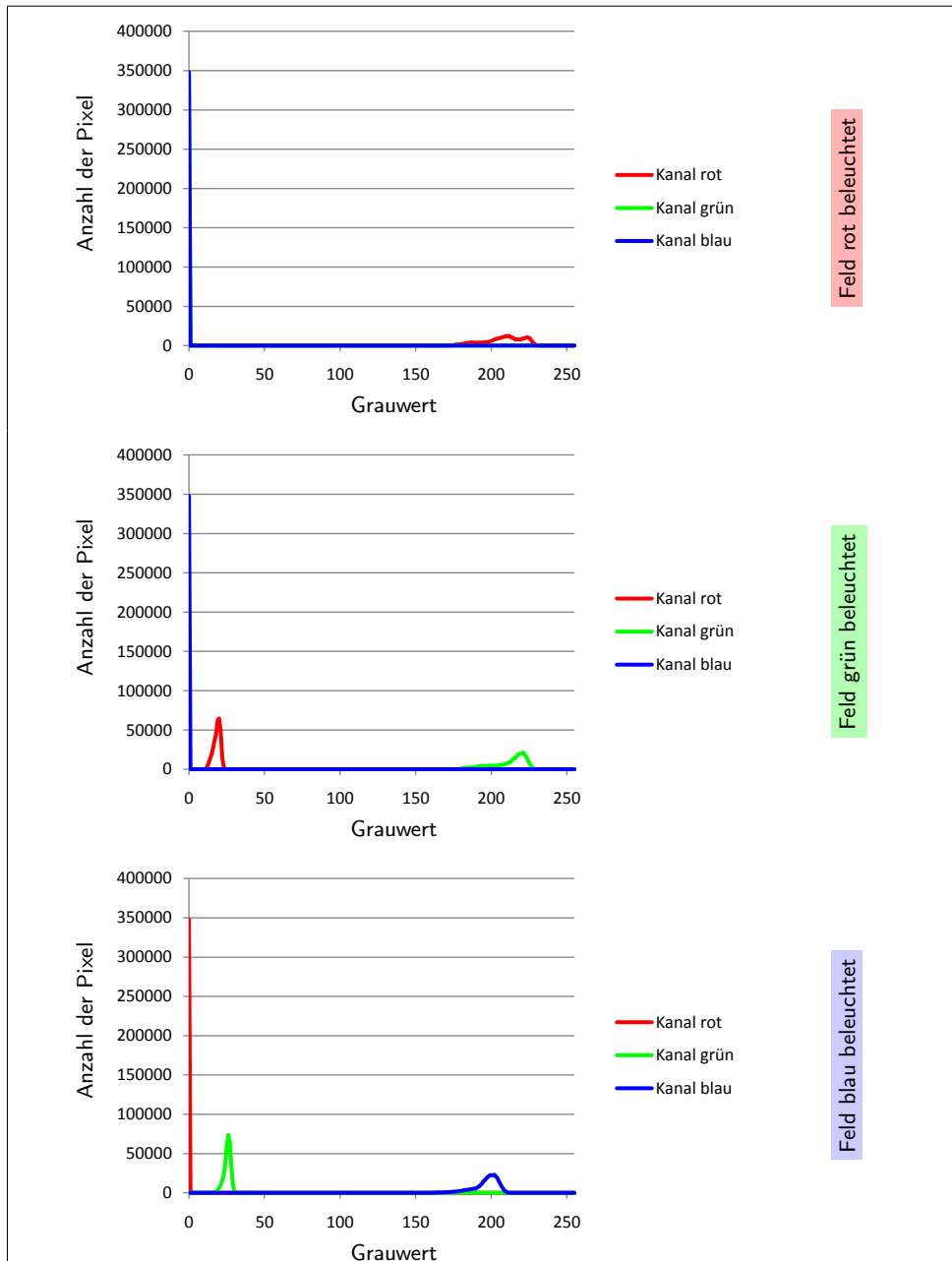


Abbildung 4.7: Spektren schmaler Bandpassfilter (gemessen)

Die Abbildung 4.7 zeigt die Spektren des zur Beleuchtung verwendeten Lichts – die Kombination aus dem Spektrum der Lampe und des entsprechenden Filters. Die Trennung ist sehr gut, es gibt praktisch keine Überlappung der Spektren. Aber die Flanken der Kurven sind nicht so steil wie gewünscht. Die Spektren haben schlanke Peaks aber etwas breite „Füße“. Die Histogramme der Versuche werden in Tabelle 4.2 dargestellt und beurteilt. Es gilt hier die gleiche Einschränkung für die Praxis wie bei den Breitbandfiltern. Ein Filter mit einem Bandpass ist ein Standardteil. Ein Filter der drei Bandpässe zugleich aufweist, ist eine Sonderanfertigung.

Tabelle 4.2: Histogramme der Einzelkanäle bei schmalbandiger Beleuchtung



Bei einer Beleuchtung mit dem 650-nm-Spektrum ist die Kanaltrennung optimal. Der rote und der grüne Kanal liefern keine Signale, die das Rauschen überschreiten. Bei den Beleuchtungen mit dem 550-nm- und dem 425-nm-Spektrum sind die Ergebnisse sehr gut. Nur jeweils einer der im Spektrum benachbarten Kanäle liefert Signale, die das Grundrauschen überschreiten. Die Signale bleiben aber unterhalb von Grauwert 25.

4.2.3 Anorganische RGB-Leuchtdioden in einem Gehäuse

Für diesen Versuch wurden LEDs verwendet, die in einem Gehäuse drei LED-Chips integrieren. Diese werden in großen Stückzahlen hergestellt und werden z. B. in großflächigen LED-Videoleinwänden oder als Hintergrundbeleuchtung von LCDs eingesetzt. Auf Grund der hohen Stückzahlen ist die Technologie auf sehr hohem Niveau. Die LEDs haben gute Lichtausbeute (Lumen pro Watt) und gutes thermisches Design (Abführung der Verlustleistung), deshalb eignen sie sich sehr gut für den Aufbau von Beleuchtungen für die Bildverarbeitung.

Verwendete Beleuchtung:

- Lichttisch-Beleuchtung bestückt mit LED Osram Multiled LRTB G6TG, siehe Abschnitt 4.1.

Die Wellenlängen sind allerdings entsprechend ihres Haupteinsatzfeldes gewählt. Optimiert wurde hier auf das Ziel, möglichst viele verschiedene Farben für den Menschen gut darzustellen. Das bedeutet, in der Darstellung der CIE-Normfarbtafel[Sch07a] soll ein möglichst großes Dreieck aufgespannt werden. Diese dominanten Wellenlängen passen deshalb nicht optimal zu den spektralen Empfindlichkeiten einer CFA-Kamera.

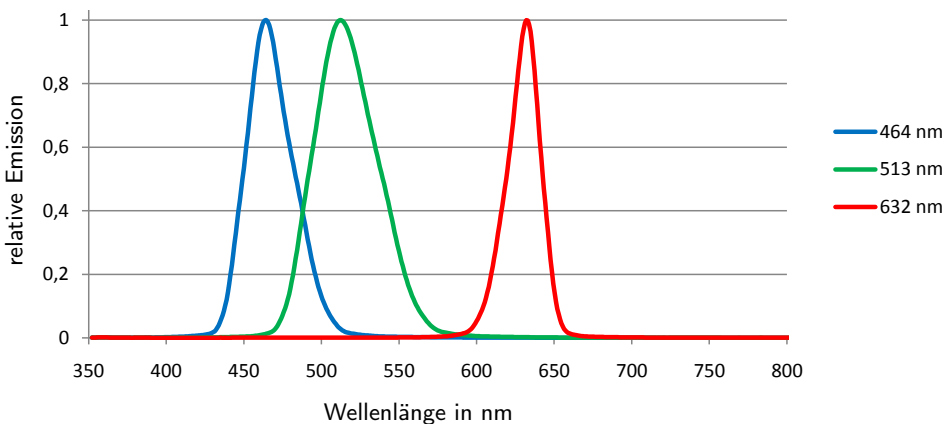
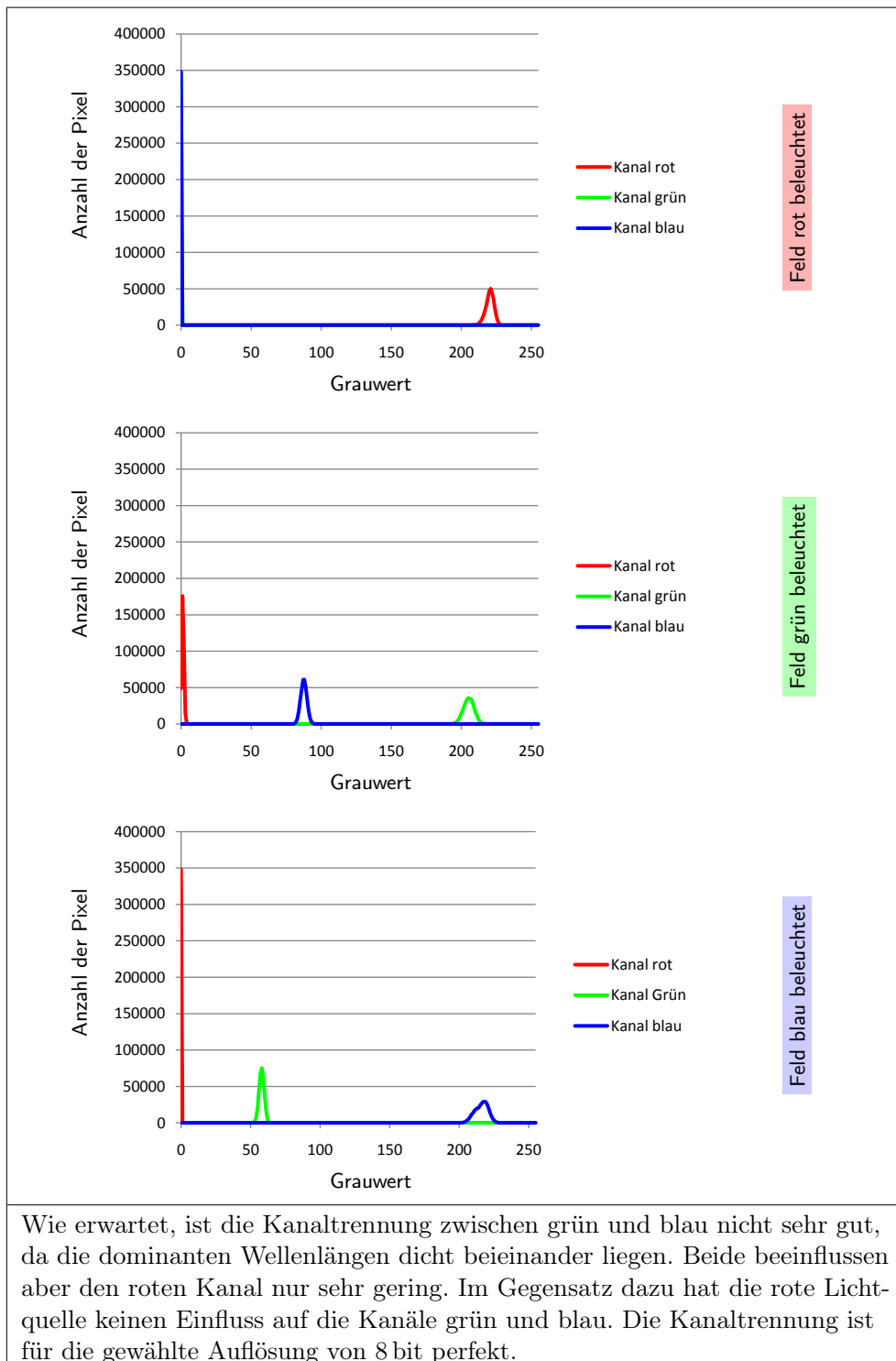


Abbildung 4.8: Spektren 3-Chip-RGB-LED

Die Einzelspektren sind sichtbar breiter als die der Metallschichtinterferenzfilter. Grün und blau liegen so dicht beieinander, dass ihr Schnittpunkt bei 40 % der Maximalintensität liegt. Das bedeutet, wenn beide LEDs gleichzeitig eingeschaltet wären, würde das Minimum zwischen ihnen 80 % der Amplitude des Maximums erreichen. Die Trennung zwischen rot und grün dagegen ist beleuchtungsseitig sehr gut. Die Ergebnisse der Kanaltrennung der Kamera, also die Kombination dieser Beleuchtungsspektren mit CFA-Filterspektren in Form von Histogrammen finden sich in Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Histogramme der Einzelkanäle bei 3-Chip-LED-Beleuchtung



4.2.4 Anorganische RGB-Leuchtdioden in getrennten Gehäusen

Für den letzten Versuch wurde eine spezielle Leuchte aufgebaut, bei der die Wellenlängen so gewählt wurden, dass sie theoretisch gut zu den spektralen Empfindlichkeiten einer Kamera mit CFA passen sollten. Im Gegensatz zu der Leuchte mit 3-Chip-LED ist deshalb die blaue LED kurzwelliger, die grüne langwelliger gewählt.

Verwendete Geräte:

- Lichttisch-Beleuchtung bestückt mit LED Osram Topled

Rot: LS E67B – Grün: LP E675 – Blau: LB E67C

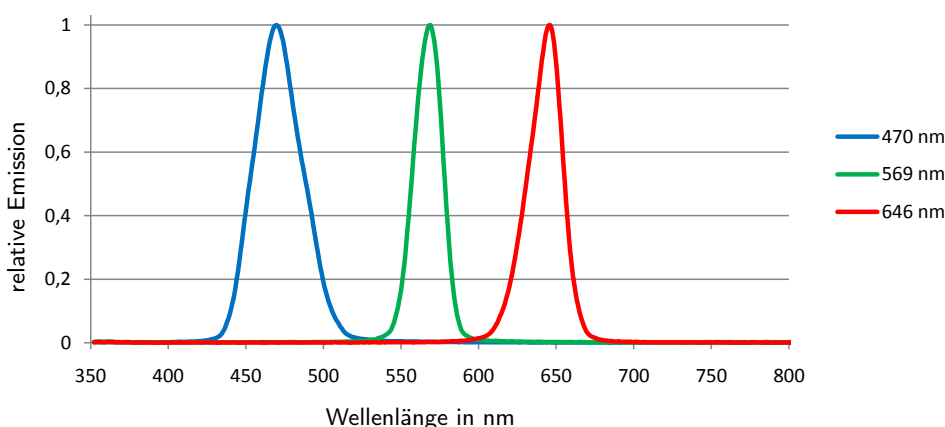
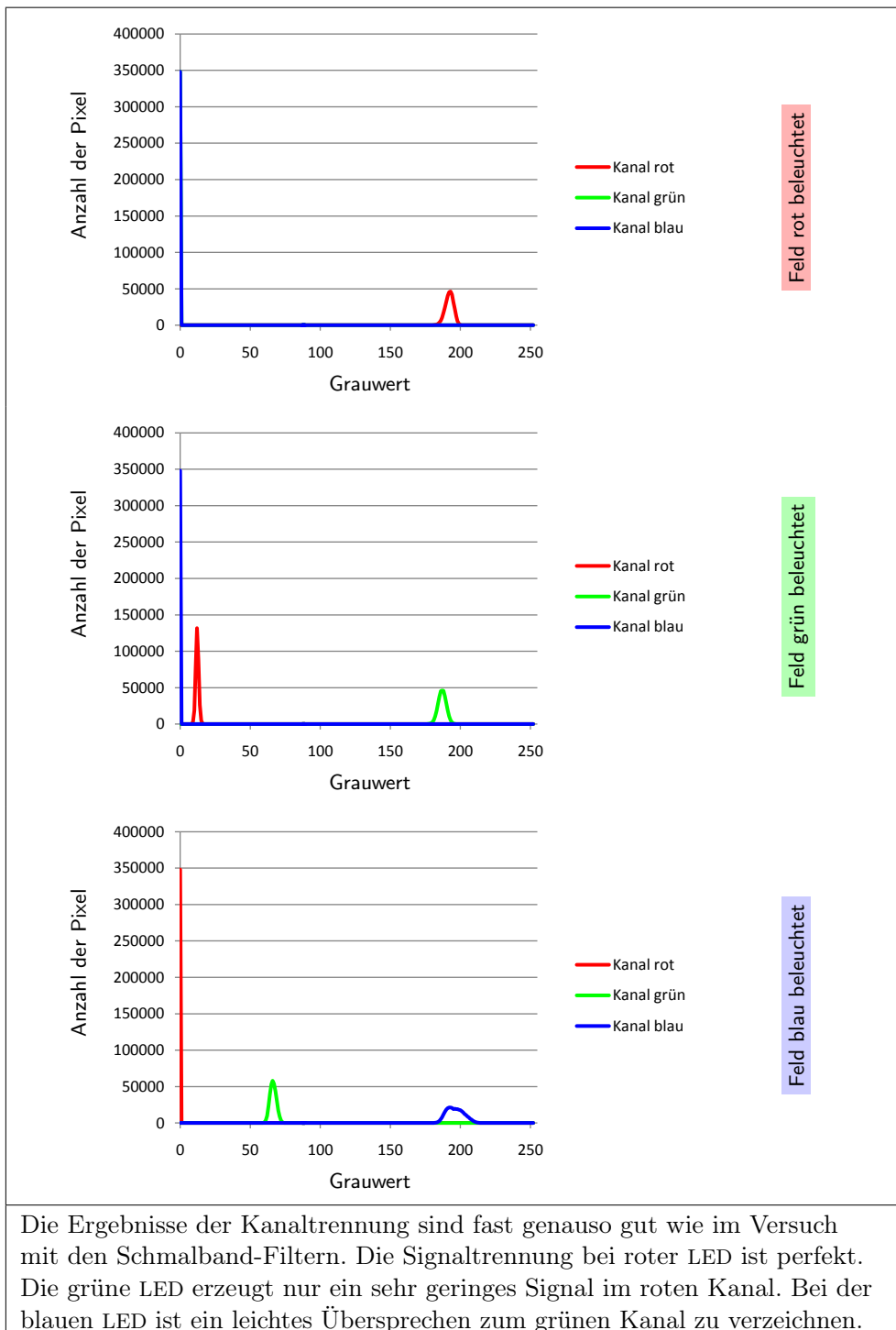


Abbildung 4.9: Spektren getrennter RGB-LEDs

Aus praktischer Sicht hat diese Leuchte zwei Nachteile: Durch den größeren Abstand der geometrischen Orte der Lichtemission der Lampen ist es konstruktiv aufwändiger, eine gute Homogenität der abstrahlenden Fläche der Leuchte zu erreichen. Der zweite Nachteil ist, dass die grüne LED mit längerer Wellenlänge energetisch sehr ineffizient ist, sie erreicht nur 2 lm W^{-1} (zum Vergleich: die grüne LED der 3-Chip-Variante erreicht 36 lm W^{-1}). Daraus resultierend ist auch die maximale Lichtleistung deutlich schlechter. Das führt dazu, dass der Einsatz an einem Koordinatenmessgerät mit Bildverarbeitung beim aktuellen Stand der Technik nicht sinnvoll ist. Die grünen LEDs, die zum Zeitpunkt dieser Arbeit kommerziell verfügbar sind, erzeugen für Einsätze, die über Laborversuche hinausgehen, zu wenig Licht.

In Tabelle 4.4 wird das Verhalten der beschriebenen Leuchte in Kombination mit einer Bayer-Pattern-CFA-Kamera anhand von Histogrammen dargestellt und bewertet.

Tabelle 4.4: Histogramme der Einzelkanäle bei RGB-LED-Beleuchtung mit separaten LEDs



Wenn die blaue LED geringfügig kurzwelliger wäre und die grüne LED für Beleuchtungszwecke eine ausreichend hohe Lichtleistung zur Verfügung stellen könnte, wäre diese Konfiguration sehr gut.

4.2.5 Zusammenfassung zum Einfluss der Beleuchtung auf die Bild- erzeugung von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Array

Wenn für Mess- oder Prüfgeräte Farbbildverarbeitung mit einer CFA-Kamera aufgebaut werden soll, sind die geprüften Beleuchtungskonzepte geeignet. Alle Beleuchtungen haben verschiedene Vor- und Nachteile bei diesem Einsatz (siehe Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: Getestete Leuchten mit ihren Vor- und Nachteilen

Beleuchtungsart	Bewertung
Breitbandlichtquelle mit Breitbandfiltern	<i>Positiv:</i> Akzeptable Kanaltrennung, gute Farbwiedergabe zu erwarten, geringer Wärmeeintrag am Ort der Strahlauskopplung <i>Negativ:</i> hoher konstruktiver Aufwand, spezielle Bauteile (Nicht-Standard-Filter)
Breitbandlichtquelle mit Schmalbandfiltern	<i>Positiv:</i> sehr gute Kanaltrennung, geringer Wärmeeintrag am Ort der Strahlauskopplung <i>Negativ:</i> hoher konstruktiver Aufwand, spezielle Bauteile (Nicht-Standard-Filter), schlechte Farbwiedergabe zu erwarten
Kombinierte RGB-Leuchtdioden	<i>Positiv:</i> akzeptable Kanaltrennung, geringer konstruktiver Aufwand, nur Standard-Bauteile, geringer Gesamtplatzbedarf <i>Negativ:</i> Wärmeeintrag nahe des Ortes der Strahlauskopplung
Einzelne RGB-Leuchtdioden	<i>Positiv:</i> gute Kanaltrennung, mäßiger konstruktiver Aufwand, nur Standard-Bauteile, geringer Gesamtplatzbedarf <i>Negativ:</i> ungenügende Strahlungsleistung, Wärmeeintrag nahe des Ortes der Strahlauskopplung

Beim Einsatz einer externen Breitbandlichtquelle, z. B. eines Kaltlichtgenerators, kann nicht mit Standardfiltern gearbeitet werden, um das Spektrum zu beeinflussen. Nach den vorliegenden Ergebnissen zu urteilen, kann ein dem Sensor angepasster Filter ausgezeichnete Ergebnisse für die Kanaltrennung erreichen, ohne dabei sehr schmalbandig zu werden. Eine sehr schmalbandige Beleuchtung hätte den Nachteil der schlechten Farbwiedergabe (siehe Abschnitt 3.2).

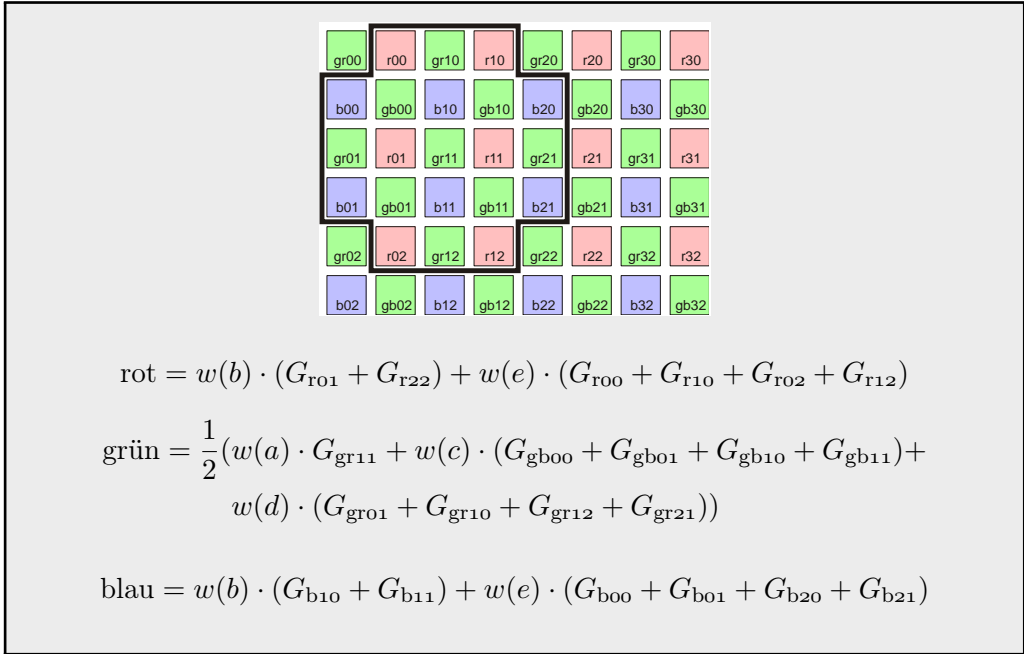
Die Option, Leuchtdioden einzusetzen, ist für die Einflussnahme auf das Spektrum weniger flexibel. Die Wahl dieser LEDs wird stark von Leistungsparameter wie Effizienz und Maximalleistung bestimmt sein. Es sind aber schon mit Standardbauteilen gute Ergebnisse zu erreichen. LEDs sind nicht zu schmalbandig, trotzdem kann eine akzeptable Kanaltrennung erreicht werden. Sie bieten zudem den Vorteil der größeren Freiheit beim Leuchtendesign wegen der einfacheren Strahlführung, der geringen Größe der Lichtquelle und der geringen Verlustleistung. Beim aktuellen Stand der Technik ist die Variante der Nutzung der 3-Chip-LEDs als Lichtquelle am sinnvollsten. Die bessere Effizienz, die höhere Lichtleistung und der geringe geometrische Abstand zwischen den Farben sind wichtige Vorteile.

4.3 Experimentelle Untersuchungen zur Rekonstruktion des Mehrkanalbildes aus Rohdaten von Kameras mit Bayer Pattern Color Filter Arrays

Die Theorie zu dem neuen CHA Demosaiking-Verfahren wird in Abschnitt 3.3 beschrieben. Es folgt die Beschreibung der Implementation und die Versuche zur Leistungsfähigkeit. Der Algorithmus für das Verfahren wurde in C++ programmiert. Er fügt sich in die Struktur der QID in Form eines Image-Prozessors ein. Die drei Kanäle werden seriell berechnet. Dadurch, dass die Kanäle völlig getrennt voneinander betrachtet werden, ist gut vorstellbar, diese Berechnung zu parallelisieren. Damit kann durch moderne Mehrkern-Prozessor-Architekturen Rechenzeit gespart werden. Die Parallelisierung wurde für diese prototypische Implementierung aber noch nicht umgesetzt. Ebenso wäre eine Erweiterung auf höhere Intensitätsauflösungen (statt 8 bit z. B. 14 bit) einfach zu realisieren.

4.3.1 Implementierung des neuen CHA Demosaikings

Die Berechnung eines Wertes an einer bestimmten Pixelposition basiert auf der Maske in Abbildung 3.5 und auf den Gewichten in Tabelle 3.2. Für Position GR11 ist die Berechnung beispielhaft in Abbildung 4.10 dargestellt.

**Abbildung 4.10:** Beispielrechnung zum CHA Demosaiking

Wegen der doppelt so hohen Pixelanzahl im grünen Kanal werden die Gewichte bei dieser Berechnung halbiert. Wird die Maske um einen Pixel weitergeschoben, ändert sich zwar die Anordnung der Pixel, die Formeln mit den Gewichten jedoch bleiben immer gleich. Wenn die Positionen der Maske als konstant betrachtet werden, so sind an der Stelle, an der zuvor rot und blau waren, nun grüne Pixel und dort, wo zuvor grün war, sind nun gleichmäßig aufgeteilt rot und blau.

In einem Algorithmus kann ein solches alternierendes Verhalten gut umgesetzt werden. Der im Rahmen dieser Arbeit implementierte Algorithmus verarbeitet die drei Kanäle des Bildes sequentiell. Er wurde in C++ geschrieben und fügt sich in eine Image-Prozessor-Klasse der QID ein. Abbildung 4.12 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Berechnungen für das CHA Demosaiking am Beispiel des grünen Kanals.

Es werden genug Zeiger zum Lesen vom Quellbild verwendet, um ohne Verschiebung zwei benachbarte Pixel des Zielbildes zu errechnen (13 Lese-Pointer, zwei Schreib-Pointer). Ihre Positionen auf den Pixeln des Bayer Patterns sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

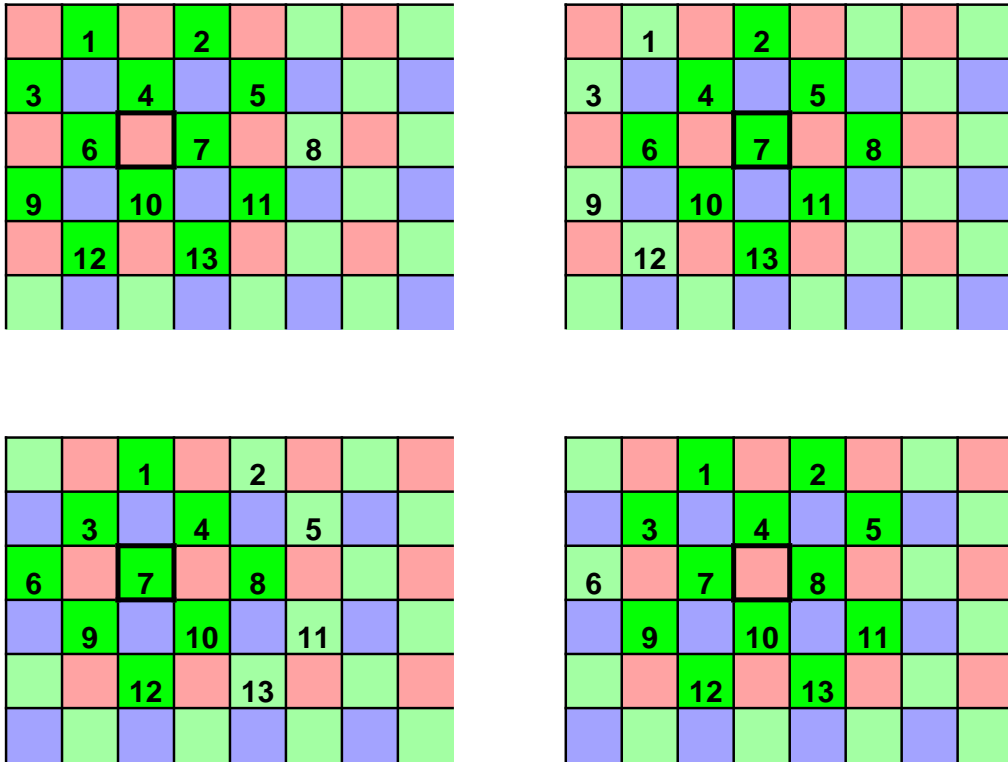


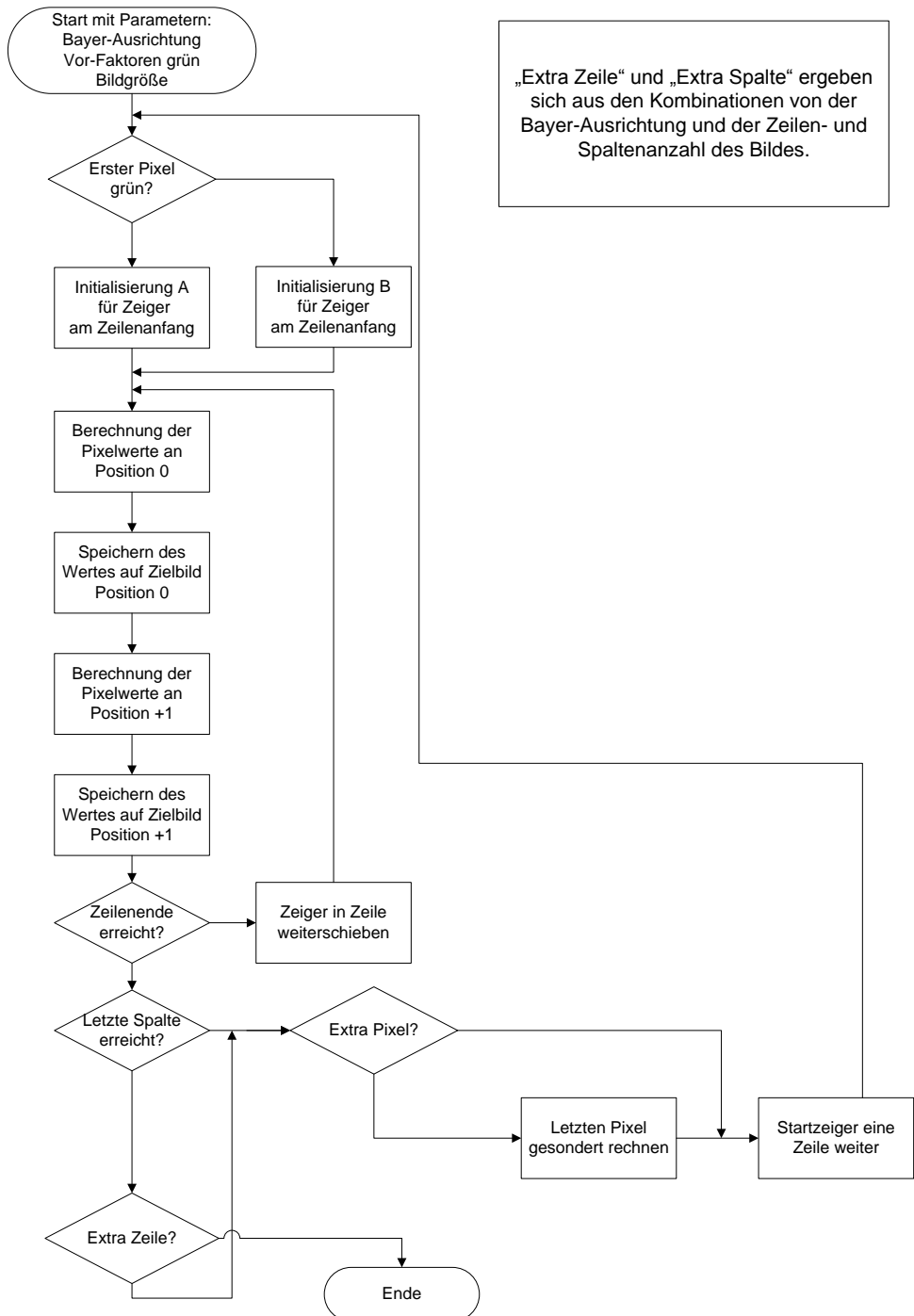
Abbildung 4.11: Verteilung der Zeiger bei Berechnungen der grünen Pixel

Es gibt vier verschiedene Start-Möglichkeiten für das Bayer Pattern, für den grünen Kanal gibt es aber nur zwei zu unterscheiden:

- Erste Zeile, erster Pixel ist ein Pixel mit einem Grün-Filter
- Erste Zeile, erste Spalte ist ein Pixel mit einem *Nicht*-Grün-Filter

Basierend auf dieser Fallunterscheidung werden die Zeiger initialisiert und dann nach dem immer selben Muster weitergeschoben.

Da für die Ränder des Bildes nicht genug Informationen vorhanden sind, um die Werte für die 5×5 -Maske zu gewinnen, können diese nicht wie der Rest des Bildes berechnet werden. Obwohl es denkbar wäre, die Ränder auf andere Weise zu berechnen, wird das nicht durchgeführt. In diesen Experimenten geht es um die präzise Kantenortsbestimmung in Bildern. Dafür sind Werte, die aus einer anderen Berechnung stammen, nicht brauchbar. Die Ränder können in jedem Fall nicht genutzt werden. Eine zusätzliche Berechnung der Ränder hätte nur „kosmetischen“ Charakter und wurde deshalb nicht ausgeführt.

**Abbildung 4.12:** Ablaufplan CHA Demosaiking für den grünen Kanal

4.3.2 Übersicht zu den experimentellen Untersuchungen des CHA Demosaikings

Zur Bewertung des neuen Verfahrens werden verschiedene Untersuchungen mit subjektiver und objektiver Beurteilung herangezogen. Die Schematik für die Versuche ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

Es werden die Ergebnisse fünf verschiedener Verfahren, inklusive des neu vorgestellten, visuell verglichen. Mit den gleichen Verfahren werden geometrische Größen in rekonstruierten Bildern gemessen und die Werte gegenübergestellt. Es folgt ein direkter Vergleich der Subpixelpräzision der Kantenrekonstruktion zwischen bilinearer Interpolation und dem neuen CHA Demosaiking-Verfahren.

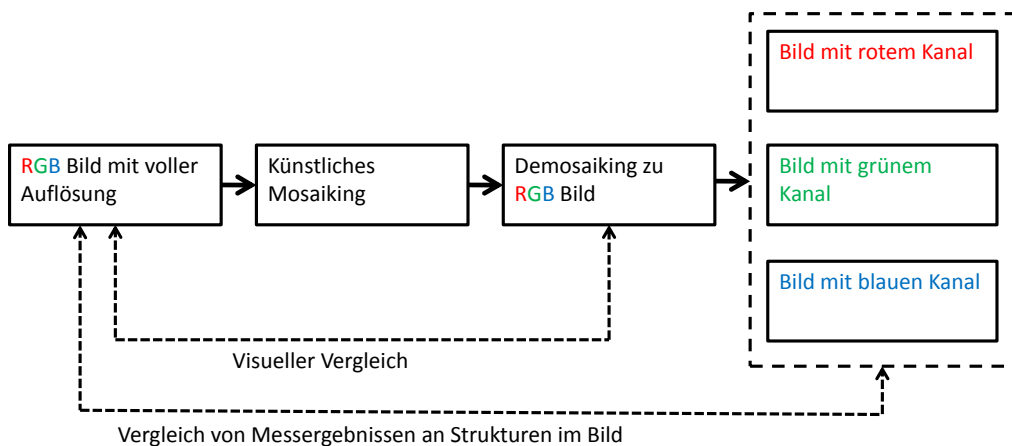


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung der Versuche zum CHA Demosaiking-Verfahren

4.3.3 Visuelle Beurteilung der Ergebnisse verschiedener Verfahren

Die erste Untersuchung ist ein subjektiver Vergleich zwischen fünf verschiedenen populären Demosaiking-Verfahren.

In Abbildung 4.15 auf Seite 83 sind stark vergrößerte Ausschnitte von RGB-Bildern zu sehen. Das abgebildete Objekt hat präzise, hochreflektive, rechteckige Strukturen auf einem sehr dunklen Untergrund. Die anderen Bildausschnitte zeigen die rekonstruierten Bilder durch die verschiedenen Demosaiking-Verfahren, nachdem das Originalbild künstlich zu einem Mosaikbild reduziert wurde.

Beim Originalbild (a) wurden sequentiell alle drei Kanäle des Bildes aufgezeichnet. Das Original hat die volle Ortsauflösung für alle Kanäle.

Die mit dem AHD-Verfahren (AHD = Adaptive Homogeneity Direction) [HP05] und der Implementation aus DCraw [Cof08] rekonstruierte Abbildung (b) wurde

speziell für Fotografie Zwecke konzipiert und steht stellvertretend für alle adaptiven Verfahren, deren Ziele maximale Auflösung und für den Menschen natürlich wirkende Bilder sind.

Abbildung (c) und Abbildung (d) wurden mit zwei verschiedenen Interpolationsverfahren rekonstruiert. Die Bikubische Interpolation und Bilineare Interpolation sind Vertreter klassischer Interpolation, wie sie sehr häufig bei Signalverarbeitung angewandt werden – nicht nur für die Bildverarbeitung.

Abbildung (e) und Abbildung (f) zeigen Ergebnisse gewichtsbasierter Approximationsverfahren. Hierzu zählen ein Verfahren nach [Sch07b] und das neue im Rahmen dieser Dissertation erarbeitete CHA Demosaiking.

Es ist gut zu erkennen, dass Abbildung (b) mehr Details wiederherstellen kann, als die anderen Verfahren. Subjektiv sind auch keine Artefakte des Demosaiking-Prozesses sichtbar. Das Ergebnis ist nicht überraschend, denn das Verfahren wurde für den Einsatz in der digitalen Fotografie entwickelt. Dabei ist hohe Detailauflösung von höchster Wichtigkeit. Die Ergebnisse von Abbildung (d) und Abbildung (c) sehen fast identisch aus. Während die Detailauflösung gut ist, wird ein Streifen-Muster (siehe auch Abbildung 4.14) quer zu den Kanten sichtbar.

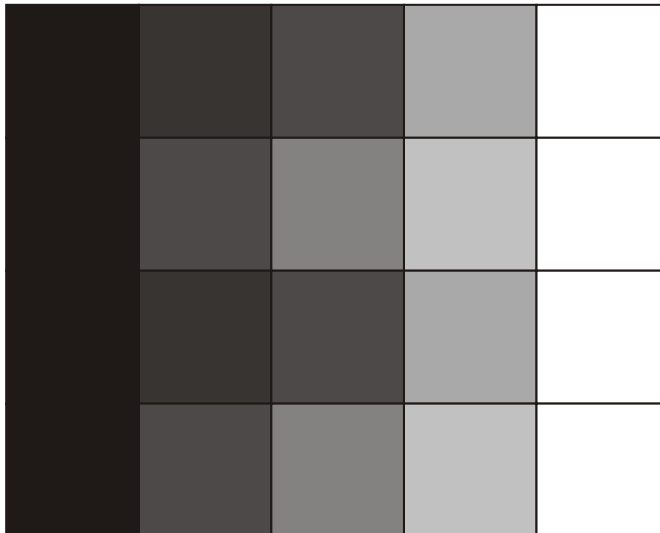


Abbildung 4.14: Schematische Darstellung des „Reißverschluss“-Effekts

Die beiden gewichtsbasierten Approximationen in Abbildung (e) und (f) zeigen den stärksten Detailverlust im Vergleich zum Originalbild, wobei (f) geringfügig besser ist als (e). Bei (e) ist die Tief-Pass-Wirkung von allen Verfahren am stärksten.

Die subjektiven Qualitäten sind wichtig für den menschlichen Betrachter, aber die Hauptanwendung für das CHA Demosaiking-Verfahren soll die Messung geometrischer Größen sein.

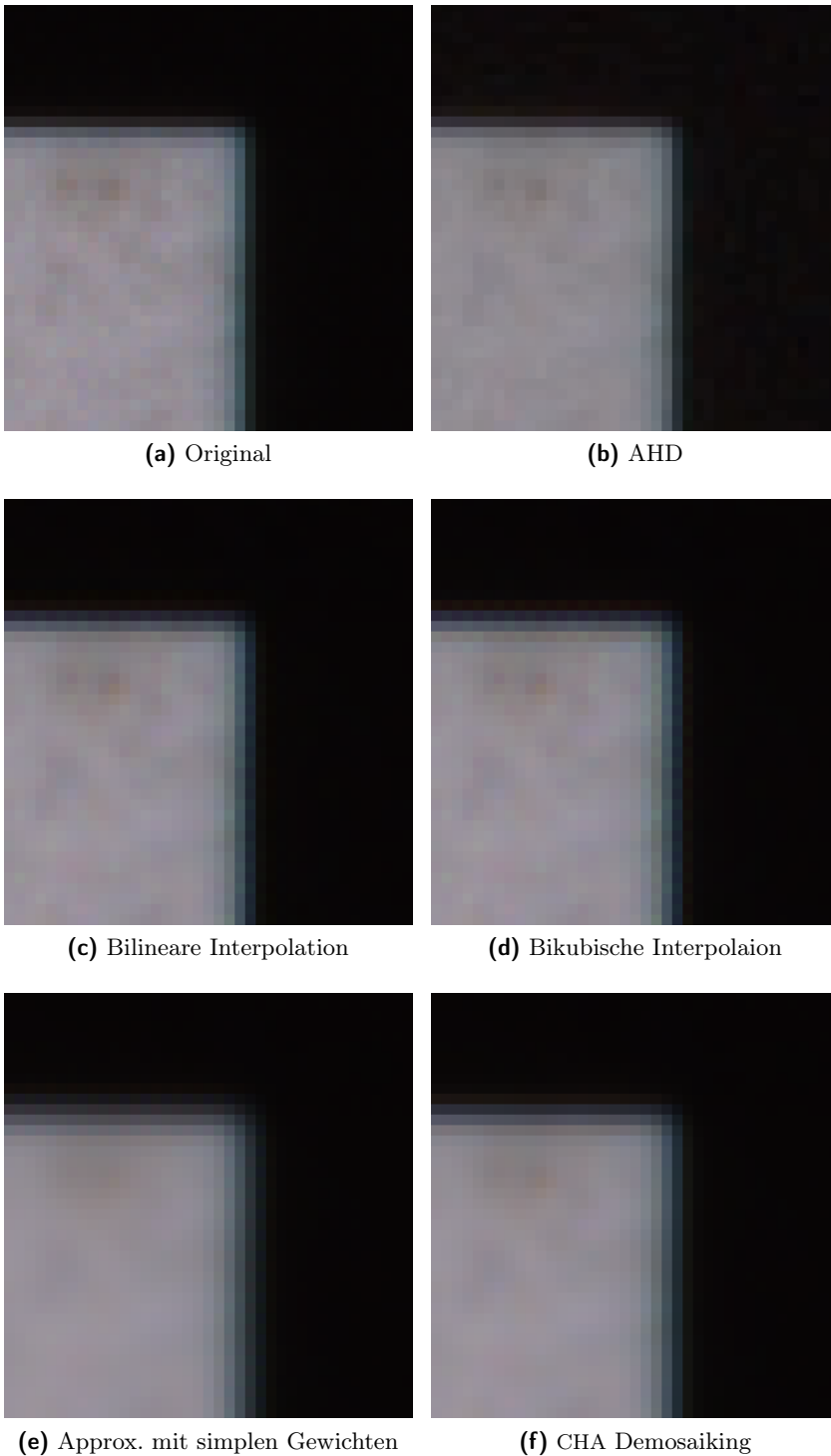


Abbildung 4.15: Subjektiver Vergleich der Rekonstruktion aus CFA-Rohdaten mittels verschiedener Verfahren

4.3.4 Vergleich der Messung geometrischer Größen in rekonstruierten Bildern

Der nächste Vergleich soll Aufschluss darüber geben, wie die verschiedenen Verfahren geometrische Strukturen in rekonstruierten Bildern beeinflussen. Es werden, wie bei dem Versuch zur subjektiven Bildqualität, nur die Eigenschaften der rekonstruierten Bilder mit denen des Originalbildes verglichen. Da die Kette der Messung mittels Bildverarbeitung sehr viele Glieder hat, sowohl hard- als auch softwareseitig, ist nur ein Vergleich der Größe des Abbildes des Objektes in den digitalen Bildern sinnvoll, nicht ein Vergleich mit der Größe des Objektes selbst. Das Objekt weist präzise, dunkle, matte Strukturen auf einem hochreflektiven, matten Untergrund auf. Das Fehlen von Farbkontrasten lässt keine Schlüsse auf eventuelle Probleme bei der Rekonstruktion der Bilder zu, die sich in Beziehungen der Kanäle zueinander wiederfinden. Die getrennte Betrachtung der Kanäle ermöglicht eine Beurteilung, ob die Rekonstruktion innerhalb des jeweiligen Einzelkanals grobe Abweichungen gegenüber dem Originalbild erzeugt. Die gemessenen Geometrien sind Kreise und Geraden (siehe Abbildung 4.16).

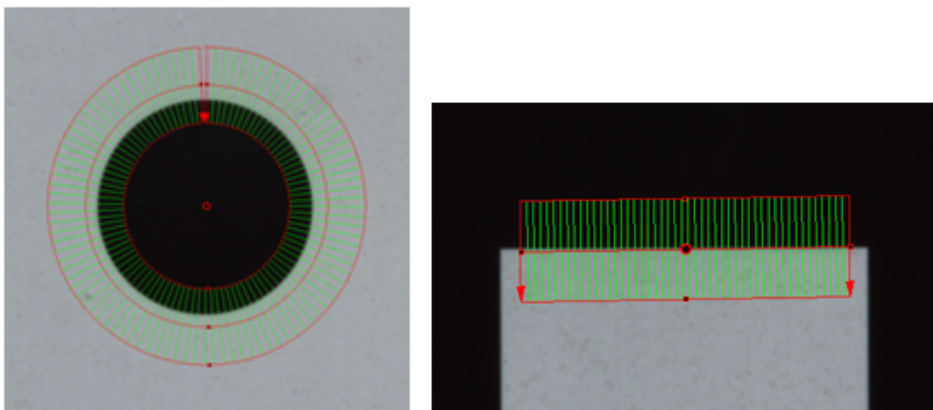


Abbildung 4.16: Darstellung der gemessenen Geometrien und deren Messfelder

Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung wurde mit Algorithmen aus der QID [Ste09] durchgeführt. Die Kantenortsbestimmung erfolgt nach einem suchstrahlbasierten Verfahren. Innerhalb einer Serie von Tests sind alle Parameter fixiert, so dass der einzige Unterschied das verwendete Demosaiking-Verfahren ist. Die Einheit aller Messergebnisse ist Pixel. Es gibt keinen Vergleich der Messwerte zu realen Objektgrößen sondern nur relative Vergleiche zu Größen im Originalbild.

Tabelle 4.6: Messwerte zu Messungen in rekonstruierten Bildern (alle Werte in Pixel)

Verfahren	Kanal Grün Kreisdurch- messer	Kanal Grün Y-Position- Gerade (horizontal)	Kanal Rot Kreisdurch- messer	Kanal Rot Y-Position- Gerade (horizontal)
(a)	155,6134	510,1743	155,5557	510,2876
(b)	-0,1877	-0,1968	-0,2254	-0,2174
(c)	-0,0016	0,0036	0,0002	0,0029
(d)	0,0026	0,0052	0,0067	-0,0002
(e)	0,0168	-0,0015	0,0183	-0,0001
(f)	0,0080	0,0006	0,0109	-0,0035

Entsprechend der Parameter der Messungen (Anzahl der Suchstrahlen, Auflösung der Einzelzeile) sollten die Ergebnisse der Geometriemessung nicht mehr als $\pm 0,02$ Pixel schwanken. Aus Tabelle 4.6 ist ersichtlich, dass alle Verfahren bis auf (b) innerhalb dieser Toleranzen bleiben. Das sehr stark auf Bilddetailrekonstruktion orientierte (b) erzeugt eine Kantenpositionsverschiebung von 0,2 Pixeln in Richtung der helleren Bildbereiche. Wahrscheinlich ist diese Verschiebung vom Grauwerthub abhängig und dürfte deshalb in der Praxis sehr schwer zu korrigieren sein. Das bedeutet nicht, dass adaptive Verfahren generell für messtechnische Zwecke ungeeignet sind, aber sie müssen vor ihrer Anwendung auf Probleme der Kantenpositionsverschiebung überprüft werden. Ohne genaue Kenntnis der Mathematik des Verfahrens ist ein Einsatz riskant. Der Reißverschluss-Effekt von (c) und (d) erzeugt vernachlässigbar geringe Abweichungen, wenn viele Suchstrahlen für die Berechnung von Geometrien verwendet werden. Bei einem gleichmäßigen Versatz in jeweils benachbarten Pixelspalten ist das Ergebnis des gemittelten Kantenorts genau die Mitte aus eben den zwei verschiedenen Spalten.

4.3.5 Subpixelgenaue Kantenposition in rekonstruierten synthetischen Bildern

Die ersten Versuche zeigen Unterschiede zwischen dem CHA Demosaiking und dem adaptiven Verfahren [HP05, Cof08]. Auch visuelle Abweichungen zu den anderen Verfahren sind sichtbar. Bei Messungen von Geometrien sind jedoch keine bzw. sehr geringe Unterschiede zwischen dem neuen CHA Demosaiking und der bilinearen Interpolation sichtbar. Die bilineare Interpolation ist von besonderem Interesse, da sie u. a. wegen ihres geringen Rechenaufwands in der industriellen Bildverarbeitung am gebräuchlichsten ist.

Die letzte Versuchsreihe besteht aus einer Serie von Bildern mit synthetischen Kantenabbildungen. Diese Kantenbilder wurden erzeugt, indem perfekte Kantenstrukturen mit einer Punktverwaschungsfunktion (Gauß-Funktion) gefaltet und in ein gerastertes Bild übertragen wurden (siehe auch Unterabschnitt 4.1.2). Der Kantenort ist damit bekannt. Es müssen keine relativen Vergleiche angestellt werden, sondern Soll- und Ist-Kantenort können direkt verglichen werden. Bei den Testbildern wird die Kante in 0,25 Pixelschritten in einem Bereich von 0–2 Pixeln verschoben. Die gleiche Vorgehensweise wie bei den vorangegangenen Tests wurde angewendet: künstliches Mosaiking, gefolgt von den verschiedenen Demosaiking-Verfahren, anschließend subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in den Einzelkanälen. Die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Position der Kante sind in den Diagrammen in Abbildung 4.17 dargestellt.

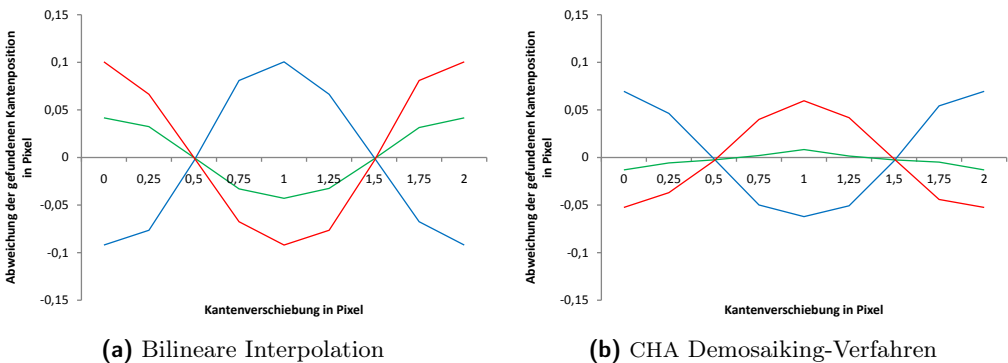


Abbildung 4.17: Kantenpositionsabweichung durch unterschiedliche Demosaiking Verfahren (Farben der Graphen entsprechen den Kanälen)

Die erste Feststellung ist, dass in beiden Diagrammen und in allen drei Kanälen eine Symmetrie zu erkennen ist. Sehr wahrscheinlich ist es eine Zwei-Pixel-Periodizität. Sie ist auf die Anordnung der Farbfilter zurückzuführen bzw. auf das künstliche Mosaiking. Die zweite Beobachtung – ebenfalls basierend auf Eigenheiten der Bayer-Filteranordnung – ist, dass die Abweichungen der Kantenposition im grünen Kanal deutlich geringer sind als im roten und blauen Kanal. Dies begründet sich auf der doppelt so hohen Anzahl der grünen Pixel bei der Abtastung des Bildes – die Auflösung ist um Faktor $\sqrt{2}$ größer. Weiterhin fällt auf, dass die Abweichungen des Kantenortes bei den beiden Verfahren entgegengesetzte Vorzeichen haben. Die Ursache für dieses Verhalten liegt in der Diskrepanz zwischen dem tatsächlichen Signalverlauf, der die Kante repräsentiert, und dem zugrundeliegenden Modell für den Signalverlauf des Verfahrens. Wenn das Signal nicht linear zwischen zwei Stützstellen verläuft, entstehen bei der bilinearen Interpolationen entsprechende Abweichungen. Das Gleiche gilt für das CHA Demosaiking Verfahren. Dass die Vorzeichen entgegengesetzt sind, bedeutet nur, dass beide Verfahren nicht das optimale Modell des Signalverlaufs für diese speziellen Testbilder haben. Die

Abweichungen des CHA Demosaiking sind jedoch geringer. Das Modell funktioniert also besser. Keine reale PSF erzeugt lineare Signalverläufe, genau wie die hier verwendete künstliche PSF. Das Ergebnis ist, dass das CHA Demosaiking besser zur Rekonstruktion von Bildern aus Sensoren mit CFA geeignet ist, wenn die Priorität auf geringen Geometrieabweichungen liegt.

4.3.6 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zum CHA Demosaiking-Verfahren

Das neue CHA Demosaiking-Verfahren zeigt in den experimentellen Untersuchungen die gewünschten Eigenschaften. Es ist besser für eine anschließende Messung geometrischer Größen geeignet als andere Verfahren. Verglichen mit dem am weitesten verbreiteten Verfahren, dem bilinearen Demosaiking, liefert es sowohl visuell als auch messtechnisch bessere Ergebnisse. Es zeigt keine Artefakte im Bild, wie die des Reißverschluss-Effekts. Im Gegensatz dazu stören beim bilinearen Demosaiking Artefakte den Bildeindruck. Der einzige Nachteil des CHA Verfahrens ist die etwas stärkere Weichzeichnung. Da die Darstellung des Bildes aber nicht die höchste Priorität hat, sondern die Eignung für Messzwecke, ist dieser Nachteil nebensächlich. Für Messzwecke liefert das CHA Demosaiking bessere Ergebnisse. In synthetischen Bildern kann nachgewiesen werden, dass die Abweichungen nur halb so groß sind, wie die beim bilinearen Demosaiking. In realen Bildern werden andere Einflüsse auf das Bild jedoch so stark, dass dieser Vorteil nicht immer eindeutig zu quantifizieren ist. Trotzdem tragen diese Abweichungen zum Gesamt-Budget der Messunsicherheit bei. Es ist zu erwarten, dass sich auch in realen Bildern die Abweichungen mit einem sehr großen Stichprobenumfang belegen lassen. Der zusätzliche Rechenaufwand für das CHA Demosaiking-Verfahren ist für moderne PCs in den meisten Fällen vernachlässigbar gering. Es wird etwa doppelt so viel Rechenzeit benötigt wie für ein vergleichbares bilineares Demosaiking. Bei aktuellen x86-kompatiblen Prozessoren bewegt sich die Prozessorauslastung aber nur im einstelligen Prozentbereich. Für andere Rechnerarchitekturen ist in jedem Fall eine besondere Implementierung nötig und dabei ist, wie erläutert, noch Optimierungspotential vorhanden.

Die Schlussfolgerung ist, dass der Einsatz des CHA Demosaikings direkt von den Zielen bei der Anwendung abhängt. Liegt die Priorität auf der Messung geometrischer Größen, ist der Einsatz sinnvoll. Sind andere Ziele wichtiger, sollten andere Demosaiking-Verfahren in Betracht gezogen werden.

4.4 Experimentelle Untersuchungen zum Differenzvektor-Kantenfilter in Mehrkanalbilddaten

In diesem Kapitel wird untersucht, ob der Filter, der die Mehrkanalbilder zu Ein-Kanal-Kantenbildern transformieren soll, die geforderten Eigenschaften aufweist. Dabei ist von größtem Interesse, ob der Ort des maximalen Kantenwertes dem Ort der ursprünglichen Kante entspricht.

Die experimentelle Untersuchung, ob der Kantenort im gefilterten Bild dem Kantenort im Originalbild entspricht, gestaltet sich schwierig, da es keine etablierten subpixelgenauen Kantenortsbestimmungs-Algorithmen für die neuen gefilterten Bilder gibt. Deshalb können die Untersuchungen nur für solche Fälle ausgewertet werden, bei denen der diskrete Grauwertverlauf symmetrisch ist und so der Ort des Maximums abgelesen werden kann. Das setzt voraus, dass der Kantenverlauf im Originalbild symmetrisch war und dass es sich um einen der zwei folgenden Kantenorte handelt:

1. Der Kantenort im Originalbild ist genau zwischen zwei Pixeln.
2. Der Kantenort im Originalbild ist genau in der Mitte eines Pixels.

4.4.1 Implementierung

Der Differenzvektor Kantenfilter ist in C++ geschrieben und gliedert sich als Image-Prozessor in die QID ein. Sein grober Ablaufplan ist in Abbildung 4.18 dargestellt.

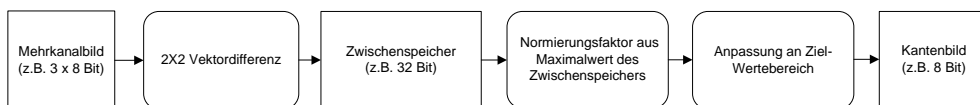


Abbildung 4.18: Datenfluss des Differenzvektor-Kantenfilters

Der Algorithmus benötigt ein `ImageAccess`-Objekt mit 3×8 bit als Eingangsdaten. Für eine zügige Abarbeitung erfolgt das Einlesen der Grauwerte der Pixel direkt aus dem Bildspeicher des Objektes. Es werden zwei Zeiger auf zwei übereinanderliegende Pixel verwendet. Vor der Berechnung eines neuen Kantenwertes werden die Werte der Adressen dieser Pixel und der jeweils fünf folgenden Byte ausgelesen und zwischengespeichert (Rot-Grün-Blau-Rot-Grün-Blau). Aus den insgesamt zwölf Werten der vier Pixel (jeweils RGB) werden die Differenzvektoren und die Summe der Vektornormen berechnet:

$$C_i = \begin{pmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$D_h = \frac{C_1 + C_3}{2} - \frac{C_2 + C_4}{2} \quad (4.5)$$

$$D_v = \frac{C_1 + C_2}{2} - \frac{C_3 + C_4}{2} \quad (4.6)$$

$$D_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_1 - C_4) \quad (4.7)$$

$$D_{d2} = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_3 - C_2) \quad (4.8)$$

$$K = (\|D_h\| + \|D_v\| + \|D_{d1}\| + \|D_{d2}\|) \quad (4.9)$$

Wenn, wie in Abschnitt 3.4 vorgeschlagen, das Quadrat der euklidischen Vektornorm verwendet wird, kann die Berechnung gut für eine maschinelle Abarbeitung umgeformt werden:

$$K = \sum_1^d (c_{1,i}^2 + c_{2,i}^2 + c_{3,i}^2 + c_{4,i}^2 - 2c_{1,i}^2 c_{4,i}^2 - 2c_{2,i}^2 c_{3,i}^2) \quad (4.10)$$

wobei d die Dimension des Farbraums ist, der in diesem Fall aus R, G und B besteht, also ist $d = 3$.

Dieses Ergebnis wird in einer Zahl mit 32-bit-Präzision zwischengespeichert. Ein Array dieser Werte entspricht dem Kantenbild mit hoher Präzision. Da aber nachfolgende Algorithmen zur Zeit nur mit 8-bit-Bildern umgehen können, erfolgt in einem weiteren Schritt die Rückrechnung auf einen ganzzahligen 8-bit-Wert. Dazu wird der Maximalwert des 32-bit-Arrays für die Normierung auf den Wertebereich von 0–255 genutzt.

$$K_{i(8\text{Bit})} = 250 \cdot \frac{K_{i(32\text{bit})}}{K_{\max(32\text{Bit})}} \quad (4.11)$$

Damit in eventuell nachfolgenden Operationen nicht die Gefahr besteht, den Wertebereich zu überschreiten wird auf 250 normiert, es gibt also einen Toleranzbereich von +5. Dieser Parameter kann umgestellt werden, sollte sich herausstellen, dass der geringe Verlust an Auflösung zu große Nachteile mit sich bringt. Bei dieser Normierung wird direkt in den Speicher des `ImageAccess`-Objektes, das zum Schluss als Ergebnis ausgegeben wird, geschrieben.

Wenn sowohl Koordinaten aus diesem Kantenbild als auch aus den Einzelkanälen des Originalbildes gewonnen werden sollen, ist zu beachten, dass die Koordinaten des Kantenbildes verschoben sind.

$$x_k = x_{\text{orig}} + 0.5 \quad (4.12)$$

$$y_k = y_{\text{orig}} + 0.5 \quad (4.13)$$

Die berechneten Kantenwerte werden in den folgenden Beispielen ohne die Normierung auf den Wertebereich des Filterbildes angegeben. Es werden nur die Kantenbilder mit hoher Präzision benutzt.

4.4.2 Kantenfilterung bei harten Schwarz-Weiß-Kanten

Bei der einfachsten Modellkante, einer Schwarz-Weiß-Kante (S/W-Kante), die so in der Realität nicht auftreten wird, gibt es keinen Verlauf der Kantengrauwerte. Der Ort der Kante ist der Ort an dem der Wechsel von hell auf dunkel erfolgt.

Position	X0	X1	X2	X3
Y0	0	0	200	200
Y1	0	0	200	200
Y2	0	0	200	200

>

Position	X0	X1	X2
Y0	0	80000	0
Y1	0	80000	0

Abbildung 4.19: Einfache Musterkante Nr. 1 und passendes Filterbild

Für die erste Beispiel-Kante (in Abbildung 4.19 links) ist der Kantenort offensichtlich bei Position $x = 1,5$, also genau zwischen zwei Pixelspalten. Die Berechnung des Kantenwertes an Position $(x_0; y_0)$ ergibt sich wie folgt:

$$K = \left| \frac{(0 + 0)}{2} - \frac{(200 + 200)}{2} \right|^2 + \left| \frac{(0 + 200)}{2} - \frac{(200 + 0)}{2} \right|^2 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(0 - 200) \right|^2 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(0 - 200) \right|^2 = 80000 \quad (4.14)$$

Wie in Abbildung 4.19 rechts gut zu erkennen, ist der Ort des Maximums im gefilterten Bild bei $x = 1$. Nach der Korrektur der bekannten Verschiebung durch die Filterung um $+0,5$ ergibt sich der erwartete Wert von $x = 1,5$. Für die einfachste denkbare Modellkante funktioniert der Differenzvektor Filter wie gewünscht.

Das zweite sehr einfache Beispiel ist der Fall einer Schwarz-Weiß-Kante, wobei der Kantenort exakt auf der Mitte einer Pixelspalte liegt. Damit haben diese Pixel Grauwerte, die dem Mittelwert der zwei Plateaus entsprechen.

Position	X0	X1	X2	X3	X4
Y0	0	0	100	200	200
Y1	0	0	100	200	200
Y2	0	0	100	200	200

>

Position	X0	X1	X2	X3
Y0	0	20000	20000	0
Y1	0	20000	20000	0

Abbildung 4.20: Einfache Musterkante Nr. 2 und passendes Filterbild

Die Berechnung der Kantengrauwerte ergibt sich wieder nach Formeln aus Abschnitt 3.4. Hier ist beispielhaft die Formel für x_1, x_2, y_0, y_1 dargestellt.

$$K = \left| \frac{0+0}{2} - \frac{(100+100)}{2} \right|^2 + \left| \frac{0+100}{2} - \frac{(100+0)}{2} \right|^2 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(0-100) \right|^2 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(0-100) \right|^2 = 20000 \quad (4.15)$$

Und zusätzlich folgt die Rechnung für Position x_2, x_3, y_0, y_1 :

$$K = \left| \frac{100+100}{2} - \frac{(200+200)}{2} \right|^2 + \left| \frac{100+200}{2} - \frac{(200+100)}{2} \right|^2 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(100-200) \right|^2 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(100-200) \right|^2 = 20000 \quad (4.16)$$

Wie gewünscht haben die Pixel in beiden Spalten des Ergebnisbildes exakt gleiche Kantenwerte. Die Kantenposition findet sich nach der Kompensation der Verschiebung um $0,5$ Pixel wie erwartet bei $x = 2$.

Dass sich der Kantenwert zwischen Beispiel eins und Beispiel zwei um Faktor vier unterscheidet, obwohl die Differenzen benachbarter Pixel sich nur um Faktor zwei unterscheiden, liegt an der Verwendung des Quadrates der euklidischen Vektornorm. Damit wird ersichtlich, warum bei der Implementierung eine Normierung auf den Wertebereich des Zielbildes nötig ist. Die prinzipielle Wirkungsweise, dass der lokale Maximalwert im gefilterten Bild an der Stelle des Kantenortes steht, wird erfüllt.

4.4.3 Kantenfilterung für synthetische RGB-Kanten

Für die nächste Stufe der experimentellen Untersuchung der Ergebnisse des Kantenfilters werden synthetische Bilder von Objektkanten verwendet, deren Eigenschaften ähnlich der realer Bilder sind.

Die synthetischen Bilder werden, wie in Unterabschnitt 4.1.2 beschrieben, erstellt. Es werden hier nur Bilder verwendet, bei denen die diskreten Grauwertverläufe eine Symmetrie um den Kantenort aufweisen. Nur so ist ohne ein zusätzliches Verfahren der mit Subpixelpräzision zu erkennende Kantenort überprüfbar. Wie bei den Schwarz-Weiß-Kanten zuvor ist das erste Beispiel eine vertikale Kante. Abbildung 4.21 zeigt die Ausschnitte aus den beiden Bildern. Der helle Streifen im gefilterten Bild entspricht der Position zwischen den mittleren farbigen Pixelspalten im Originalbild.

Beispiel 1: Vertikale Kante (VK), Kantenort zwischen zwei Pixelspalten:

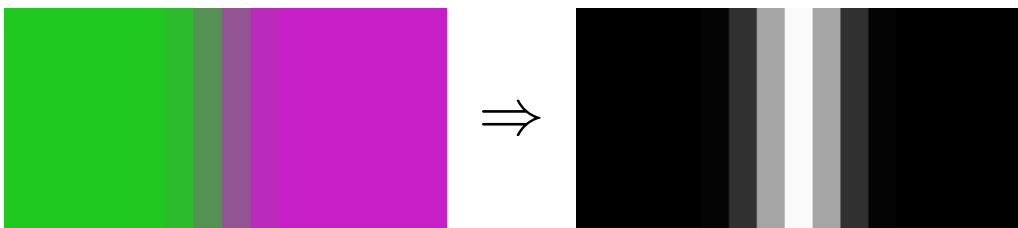


Abbildung 4.21: Synthetisches Bild VK und mittels Differenzvektor gefiltertes Bild

Die Farben des Originalbildes ergeben sich dadurch, dass bei der synthetischen Kante von links nach rechts die Grauwertverläufe von rot und blau ansteigen, während grün abfällt (siehe Abbildung 4.22). Der Maximalwert im Grauwertverlauf des gefilterten Bildes ergibt sich entsprechend an der Position zwischen den Werten in den Verläufen des Originalbildes, bei dem die Differenzen am größten sind.

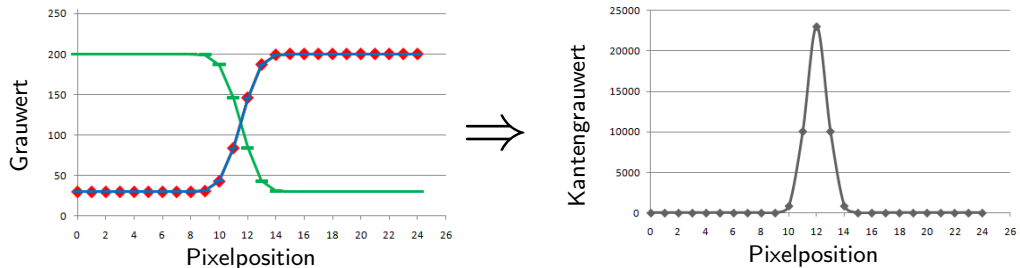


Abbildung 4.22: Grauwertverläufe des Originalbildes VK und des Kantenbildes

Abbildung 4.23 enthält die tatsächlichen Grauwerte beider Bilder. Der Kanten-Soll-Ort liegt zwischen den Spalten vier und fünf. In der letzten Zeile der Abbildung 4.23 sind die Kantenwerte des gefilterten Bildes aufgelistet. Das Maximum befindet sich wie erwartet auf der Pixelspalte vier. Das entspricht exakt der Kanten-Soll-Position.

Rel. Position	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
GW Rot	30	30	31	43	84	146	187	199	200	200
GW Grün	200	200	199	187	146	84	43	31	30	30
GW Blau	30	30	31	43	84	146	187	199	200	200
GW Kante		0	6	864	10086	23064	10086	864	6	0

Abbildung 4.23: Diskrete Grauwerte von Original und gefiltertem Bild: Vertikale Kante

Gut zu erkennen ist in Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23, dass das symmetrische Verhalten der Kante im Original-Bild in einen symmetrischen Peak der Kantenwerte übertragen wird.

Ein weiteres Beispiel einer rastersynchronen Kante (horizontal oder vertikal) ist nicht nötig. Es wurde bereits bei harten S/W-Kanten gezeigt, dass die Fälle ebenfalls wie erwartet bearbeitet werden. Bei der nächsten Untersuchung ist eine schräge Kante von Interesse. Es wird nur ein Fall betrachtet, bei dem eine Symmetrie zu erkennen ist und bei dem deshalb auch ohne nachfolgende Algorithmen der Kantenort bestimmt werden kann.

Beispiel 2: Schräge Kante (SK) unter 45°-Winkel:

R 200 G 30 B 200	R 199 G 31 B 199	R 196 G 34 B 196	R 185 G 45 B 185	R 158 G 72 B 158	R 115 G 115 B 115	R 72 G 158 B 72	R 45 G 185 B 45	R 34 G 196 B 34
R 199 G 31 B 199	R 196 G 34 B 196	R 185 G 45 B 185	R 158 G 72 B 158	R 115 G 115 B 115	R 72 G 158 B 72	R 45 G 185 B 45	R 34 G 196 B 34	R 31 G 199 B 31
R 196 G 34 B 196	R 185 G 45 B 185	R 158 G 72 B 158	R 115 G 115 B 115	R 72 G 158 B 72	R 45 G 185 B 45	R 34 G 196 B 34	R 31 G 199 B 31	R 30 G 200 B 30

Abbildung 4.24: Ausschnitt eines synthetischen Bildes: Schräge Kante

Abbildung 4.24 zeigt das Original-Bild und Abbildung 4.25 das gefilterte Bild. In beiden sind für die Pixel jeweils die Grauwerte der Kanäle eingetragen. Zeilen- oder spaltenweise betrachtet, zeigt das Originalbild die gleiche Symmetrie wie das vorangegangene Beispiel. Der Unterschied ist, dass die Kante unter einem Winkel von 45° durch das Bild verläuft, deshalb ist diese Symmetrie von einer Zeile zur nächsten um jeweils einen Pixel verschoben. Im Originalbild repräsentiert eine Gerade durch die Mittelpunkte der grauen Pixel (R_{115} , G_{115} , B_{115}) den Kantenort (rote Linie). Im gefilterten Bild finden sich an den korrespondierenden Stellen (Verschiebung $(x + 0,5; y + 0,5)$) wie erwartet die maximalen Kantenwerte. Die umgebenden Bereiche sind auch im Kantenbild in den Zeilen und Spalten vollständig symmetrisch. Der Kantenort im gefilterten Bild liegt somit an der erwarteten Position.

3	48	588	4332	14700	22188	14700	4332	588	48
48	588	4332	14700	22188	14700	4332	588	48	3
588	4332	14700	22188	14700	4332	588	48	3	0
4332	14700	22188	14700	4332	588	48	3	0	0

Abbildung 4.25: Ausschnitt eines gefilterten synthetischen Bildes: Schräge Kante

4.4.4 Untersuchungen des Differenzvektor-Kantenfilters an realen Mehrkanalbildern

Es wurden Versuche sowohl für Durchlicht- als auch für Auflichtobjekte durchgeführt, sie sind in Abbildung 4.26 inklusive Ausschnittvergrößerungen dargestellt. Die Vorgehensweise für die Versuche war folgende:

1. Bildaufnahme mit schmalbandiger Beleuchtung (LED: 625 nm, 528 nm, 470 nm)

2. Messung verschiedener Kreisdurchmesser an den Objekten

- a) In den Einzelkanälen
 - i. Im Originalbild mittels Kantenortskriterium-Schwellwert
 - ii. Im gefilterten Bild mittels Kantenortskriterium-Schwellwert; doppelte Antastung von beiden Seiten des Lichtbandes und Bestimmung des Mittelwertes
- b) Im RGB-Bild
 - i. im gefilterten Bild mittels Kantenortskriterium-Schwellwert; doppelte Antastung von beiden Seiten des Lichtbandes und Bestimmung des Mittelwertes

Im ungefilterten RGB-Bild wurden keine Messungen durchgeführt, weil es keinen etablierten Algorithmus gibt, der die Kantenortsbestimmung in Bildern mit mehreren Kanälen durchführen kann.

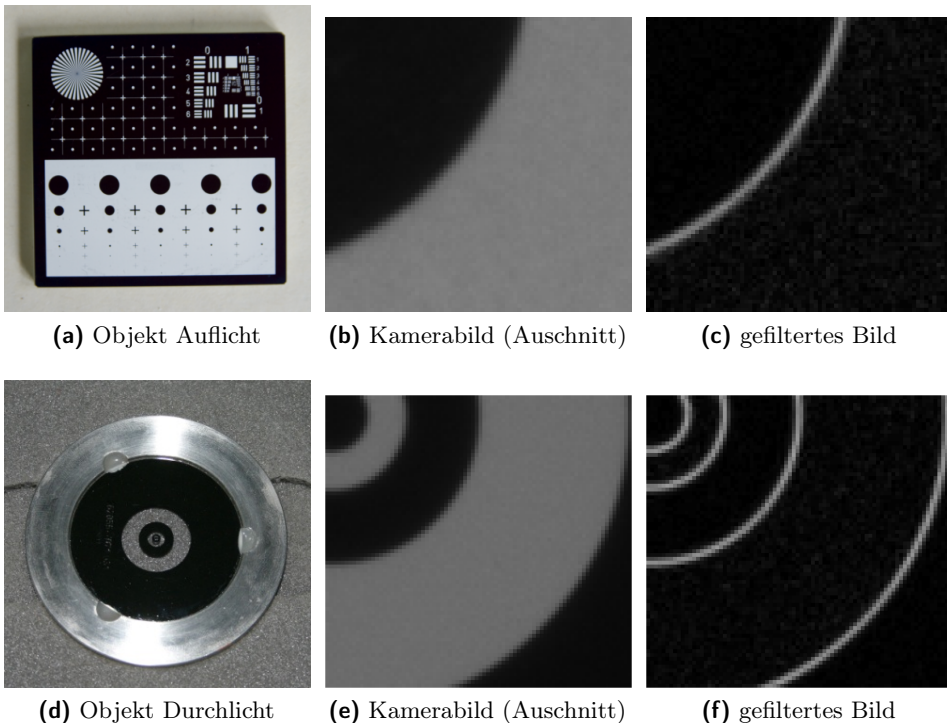


Abbildung 4.26: Messobjekte für Durch- und Auflicht

Bei den im Anschluss vorgestellten Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass die Methode zur Kantenortsbestimmung in den gefilterten Bildern nicht für diesen Einsatz konzipiert wurde. Es wird ein Kantenortskriterium eingesetzt, das für normale Kanten, also Übergänge von hell zu dunkel (oder umgekehrt) gedacht ist. Wird es für ein Lichtband, wie es im gefilterten Bild entsteht, genutzt, so

wird nur die erste ansteigende Flanke als Kantenort gefunden. Um es dennoch zu verwenden, wird ein zweites Mal in umgekehrter Richtung gesucht und dabei die andere Flanke gefunden. Solange das Lichtband als symmetrisch angenommen werden kann, sollte der Mittelwert aus beiden Flankenpositionen dem Kantenort entsprechen.

Tabelle 4.7: Ergebnisse Kreismessung bei gefilterten Bildern

Messung in Bild:	Auflicht dunkler Kreis		Durchlicht heller Kreis		Durchlicht dunkler Kreis	
	Durch- messer (in Pixel)	Std.- Abw.	Durch- messer	Std.- Abw.	Durch- messer	Std.- Abw.
original rot	77,705	0,011	77,629	0,008	154,674	0,003
rot gefiltert	77,865	0,019	77,484	0,011	155,090	0,012
original grün	77,722	0,008	77,682	0,008	154,814	0,005
grün gefiltert	77,899	0,017	77,433	0,009	155,054	0,008
original blau	77,705	0,008	77,685	0,006	154,885	0,005
blau gefiltert	77,876	0,006	77,327	0,017	154,971	0,012
Kombiniertes RGB-Bild gefiltert	77,862	0,014	77,431	0,011	155,040	0,006

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Die Standardabweichungen sind für die Messungen in den gefilterten Bildern höher als in den Originalbildern. Die Ursache ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit, dass das eingesetzte Verfahren für die Kantenortsbestimmung nicht für diese Messung konzipiert ist. Trotzdem sind die Abweichungen relativ gering. Das Lichtband kann durchaus als Kante erkannt und gemessen werden.

Die gemessenen Durchmesser liegen sehr dicht beieinander. Für das gleiche Messobjekt unterscheiden sich die gemessenen Durchmesser weniger als $\pm 0,2$ Pixel. Es gibt aber systematische Abweichungen. Die Messwerte der gefilterten Bilder sind, verglichen mit den ungefilterten Bildern, um $0,1$ – $0,3$ Pixel in Richtung der hellen Bereiche des Bildes verschoben. Die Ursache dafür ist vermutlich das verwendete Kantenortskriterium. Für die Kantenortsbestimmung mittels Schwellwert wird vorausgesetzt, dass die Flanken des „Lichtbandes“ auf beiden Seiten die gleiche Charakteristik haben. Nur dann ist die Mitte zwischen beiden Punkten auch das Maximum des Lichtbandes. Bei den untersuchten Bildern sind die Flankenverläufe nicht gleich. Das führt in diesem Fall zu einer Verschiebung in Richtung der hellen Bereiche. Die Nutzung des Quadrates der euklidischen Norm trägt auch dazu bei. Dieses Verhalten ist kein Fehler des Verfahrens, es ist seine grundlegende Wirkungsweise. Eine Schlussfolgerung daraus ist, dass der Anstieg der Flanken des gefilterten Signalverlaufs nicht gut als Kriterium geeignet ist, um den Kantenort zu

bestimmen, bzw. nur dann, wenn es mit Sicherheit keine Verletzung der Symmetrie gibt.

Es kann mit dieser Testreihe weder bewiesen noch widerlegt werden, dass der neue Differenzvektor-Kantenfilter bei reellen Kamerabildern den maximalen Kantenwert am Soll-Ort der Kante erzeugt. Erst in Kombination mit passenden Kantenortskriterien kann diese Frage endgültig beantwortet werden.

4.4.5 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zum Differenzvektor-Kantenfilter

Der untersuchte Kantenfilter kann nicht allein stehend bewertet werden. Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen an synthetischen Bildern ist bewiesen worden, dass der Filter sich wie gewünscht verhält. Ob der Kantenfilter aber in der Praxis dazu geeignet ist, für die subpixelgenaue Kantenortsbestimmung verwendet zu werden, hängt zusätzlich davon ab, wie in den gefilterten Bildern der Kantenort bestimmt wird. Versuche mit den gefilterten Bildern und etablierten Ein-Kanal-Verfahren für die Kantenortsbestimmung haben gezeigt, dass diese Kombination nicht für höchste Genauigkeiten geeignet ist. Die Bestimmung des Ortes des maximalen Grauwertes im Kantenbild kann mit diesen Verfahren nicht direkt erfolgen. Erst die neuen an die Problemstellung angepassten Verfahren zur Kantenortsbestimmung werden das ermöglichen. Durch die Auswertung der entsprechenden Untersuchungen wird sich zeigen, ob der Weg über die Nutzung des Differenzvektor-Kantenfilters sinnvoll ist. Die Ergebnisse dieses Abschnitts der Arbeit lassen aber ein positives Ergebnis für die weiterführenden Experimente erwarten.

4.5 Experimentelle Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Vektordifferenz-Kantenbildern

Die theoretischen Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung werden in Abschnitt 3.5 beschrieben. Aus diesen Überlegungen allein konnte noch nicht entschieden werden, welches der erarbeiteten Interpolations- bzw. Approximationsverfahren sich am besten für die gefilterten Bilder eignet. In diesem Kapitel wird die Beispiel-Implementierung erläutert, und es werden verschiedene Versuchsreihen zur Messung geometrischer Größen sowohl in synthetischen als auch in reellen Kamerabildern vorgestellt. Bei den Messungen in synthetischen Bildern ist die Soll-Kantenposition bekannt und eine direkte Bewertung der Messwerte möglich. Bei den Bildern, die mit einer Kamera aufgezeichnet wurden, sind nur relative Vergleiche möglich. Verglichen werden Verhältnisse von Größen im Bild miteinander.

4.5.1 Implementierung des neuen Verfahrens zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Vektordifferenz-Kantenbildern

Die Implementierungen zur Funktionsprüfung des neuen Konzeptes erfolgen als kompatible Softwarekomponenten für die QID (siehe Unterabschnitt 4.1.3). Es sind mehrere Schritte nötig, um vom Kantenbild bis zur Ausgabe der Koordinate eines Kantenpunktes zu kommen. Einige davon werden ohne Änderung aus der QID genutzt, ein Teil wird durch die neuen Kantenortskriterien ersetzt.

- Zugriff auf den Bildspeicher des Differenzvektor-Kantenfilters mittels der Klasse `CImageAccess` [Lin08]
- Bestimmung des Kantenortes über die Funktion `searchcontpoint` der Klasse `CEdge` [Lin08]

Innerhalb der Klasse `CEdge` wird der diskrete Grauwertverlauf aus den Daten des Bildes und den Koordinaten des Suchstrahls berechnet (QID). Danach erfolgt eine pixelgenaue Suche nach dem Kantenort (neu). Die Grauwerte der Pixel um den potentiellen Kantenort werden an die neuen Kantenortskriterien übergeben, mit dem Ergebnis des Kantenorts in Suchstrahlkoordinaten. Zum Schluss erfolgt die Rückrechnung der Suchstrahlkoordinaten in Bildkoordinaten (QID) und die Rückgabe der Werte.

Pixelgenaue Kantenortsbestimmung

Der Algorithmus für die prototypische Implementierung ist möglichst einfach gehalten. Dieselbe Systematik zur Bestimmung des pixelgenauen Kantenortes wird für alle drei neuen Verfahren verwendet. Die Eingrenzung der groben Position des Kantenortes ist in jedem Fall nötig. Wenn z. B. die Spline-Interpolation auf den gesamten Suchstrahl angewendet würde, ist vor der Bestimmung des Maximums eine Beschränkung auf eines der Polynome notwendig. Ein Suchstrahl mit vielen lokalen Maxima ist für Verfahren wie die Approximation mittels einer Gauß-Funktion problematisch, falls alle Grauwerte einbezogen werden müssen. Zusätzlich hat die grobe Lokalisierung des Kantenortes den Vorteil, dass Rechenzeit gespart wird. Eine pixelgenaue Maximumsuche ist weitaus einfacher berechenbar als eine Interpolation oder Approximation, besonders bei sehr vielen Stützpunkten.

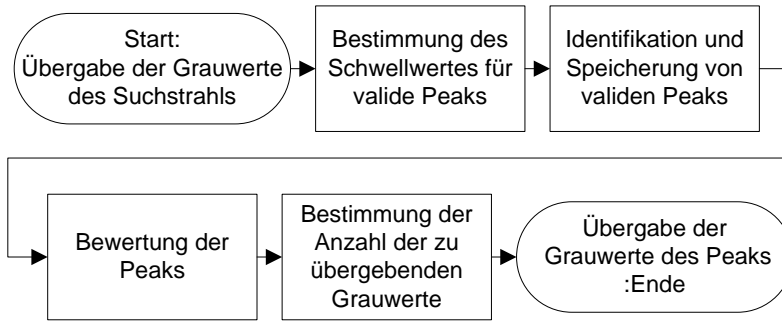


Abbildung 4.27: Ablaufplan der pixelgenauen Kantensuche

Im ersten Schritt wird aus den Grauwerten des Suchstrahls der Schwellwert berechnet, mit dem die Peaks von anderen Gebieten auf dem Suchstrahl getrennt werden. Er wird bei dieser Implementierung aus dem Mittelwert und der Standardabweichung aller Grauwerte des Suchstrahls berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i \quad (4.17)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.18)$$

$$SW = \bar{x} + S \quad (4.19)$$

Ziel dabei ist, dass auch bei extremen Grauwertverhältnissen die Peaks von Nicht-Peaks noch getrennt werden. Beispielsweise würden bei einem sehr langen Plateau viele der Grauwerte auf einem hohen Niveau liegen. Der Schwellwert muss unter diesem Niveau eingestuft werden. Solange das Plateau noch kürzer als die Hälfte der Suchstrahlänge ist, sollte diese Vorschrift zur Bestimmung des Schwellwertes funktionieren. Für Suchstrahlen ohne Plateaus, ohne Peaks und nur mit normalverteilten Grauwerten würden 84,14 % der Pixel unterhalb des Schwellwertes eingeordnet werden.

Der zweite Schritt dient dazu, mit Hilfe des Schwellwertes die möglichen „Kandidaten“ für eine Kantenortsbestimmung zu finden. Entlang des Suchstrahls wird jeweils bei benachbarten Pixeln nach Über- bzw. Unterschreiten des Schwellwertes gesucht. Zusammenhängende Gebiete werden mit Start- und Endpunkt in einer entsprechenden Struktur gespeichert.

Im nächsten Schritt werden diese „Kandidaten“ bewertet und bereits vorsortiert. Das geschieht über die Bestimmung der Integrale der Kantengrauwerte der Intervalle bzw. der Summe der Grauwerte, die als zusammenhängend eingestuft wurden. Im Speicher für mögliche „Kandidaten“ verbleiben jetzt nur noch Peaks, die eine Mindestgröße haben. Diese ist als prozentualer Anteil des Flächeninhalts des größten Peaks definiert und kann gegebenenfalls angepasst werden. Für

die durchgeführten Versuche an reellen und synthetischen Bildern hat sich 70 % des Flächeninhalts als praktikabel erwiesen. Die nächste Funktion erfüllt zwei Aufgaben gleichzeitig. Es wird geprüft, beginnend vom Suchstrahlstartpunkt aus, ob die verbliebenen Peaks auswertbar sind, und es wird berechnet, welche der Stützstellen um den Peak herum an die nachfolgende Auswertung weitergegeben werden. Ein Peak gilt als nicht auswertbar, wenn er plateauartig beschaffen ist, dabei aber zu große Grauwertschwankungen auf dem Plateuniveau ausweist. Diese Variable ist veränderbar. Für die durchgeführten Versuche wurde eine Abweichung von mehr 10 % des maximalen Grauwerts zu den niedrigeren Werten als nicht tolerabel definiert. Damit wurden gute Ergebnisse erzielt. Peaks, die nicht plateauartig beschaffen sind, also bei denen vom Maximalwert aus in beide Richtungen die Grauwerte kontinuierlich abfallen, werden generell als auswertbar eingestuft. Plateaus mit weniger geringen Schwankungen werden ebenfalls akzeptiert, obwohl die Auswertung mittels Spline-Interpolation durchaus Schwierigkeiten bereiten könnte.

Für die Kantenortsbestimmung gibt es keine weitere Auswahl. Standardvorgehen für die QID ist, dass die erste valide Kante angetastet wird. Das neue Verfahren erfüllt diese Vorgabe. Die erste Kante, die als auswertbar eingestuft wird, wird analysiert. Dann wird festgelegt, welche Grauwerte der Interpolation oder Approximation übergeben werden. Die Anzahl der Grauwerte hängt davon ab, wie „wellig“ das Plateau ist, also wie viele lokale Maxima der eine Peak enthält.

Die Entscheidung wird über eine Tabelle getroffen (siehe Tabelle 4.8). Die Werte wurden unter folgenden Gesichtspunkten festgelegt:

- Alle drei Kantenortskriterien sollen auf dieselbe Anzahl von Stützpunkten zurückgreifen.
- Die Verteilung der Stützpunkte soll symmetrisch um den Peak liegen. Bei einem Maximum innerhalb des Peaks ist deshalb eine ungerade Anzahl vorgeschrieben.
- Die Anzahl der Stützpunkte ist gering zu halten, da das Signal-Rausch-Verhältnis eines Pixels proportional zu seinem absoluten Grauwert ist (solange nicht übersteuert wird). Die Pixel am Rand des Peaks haben eine deutlich niedrigere Intensität und damit eine höhere Unsicherheit.

Tabelle 4.8: Festlegung der Stützpunktanzahl

Anzahl der Maxima	1	2	3	4	≥ 5
Anzahl der Stützpunkte	5	6	7	8	Anzahl Maxima + 2

Die Approximation mit Polynomen vierten Grades benötigt eine Mindestanzahl von fünf Stützpunkten. Bei fünf Stützpunkten funktioniert sie noch, wechselt aber zu einer Interpolation. Die Einschränkung führt nicht generell zu einem

Problem bei der Auswertung der Ergebnisse. Es muss berücksichtigt werden, dass die synthetischen Bilder für die Polynom-Approximation vierten Grades nicht unter optimalen Bedingungen auf den synthetischen Bildern arbeiten kann. In einigen Fällen kann sie zur Interpolation werden.

Implementierung der Approximation mittels Polynomen

In der QID sind bereits fertige Funktionen zur Approximationen von Polynomen zweiten und vierten Grades für äquidistante Stützstellen vorhanden. Sind sind Teil der Dynamic Link Library (DLL) `q_grnd`:

- Polynomapproximation zweiten Grades: `Polynom2` und `Polynom2_Xi`
- Polynomapproximation vierten Grades: `Poly4_calc`

Die Approximation der Gauß-Funktion kann, wie in Unterabschnitt 3.5.3 gezeigt, auf eine Polynomapproximation zweiten Grades zurückgeführt werden. Die Implementierung ist beschränkt auf die Kapselung in Funktionen, auf die Zuführung der zuvor bestimmten Grauwerte zur Approximationsfunktion der QID und auf die Bestimmung des Ortes des Maximums aus den Koeffizienten des Polynoms.

Für die Approximation des Polynoms vierten Grades ist die QID-Funktion nicht vollständig nutzbar. Sie enthält zwar bereits Möglichkeiten zur Bestimmung des Ortes des Maximums, für die hier gewünschte Anwendung ist aber die Position der mittleren Extremstelle von Interesse, unabhängig davon, ob es sich um ein Minimum oder Maximum handelt. Damit die nachfolgende Bestimmung der Nullstelle der ersten Ableitung beim mittleren Extremum konvergiert, ist es wichtig, den Startpunkt bereits nahe an den Ort des Extremums zu legen. Wie in Unterabschnitt 3.5.1 beschrieben, wird dies über Vorzeichenwechsel der ersten Ableitung in Kombination mit einem Extremum der zweiten Ableitung gewährleistet (siehe auch Abbildung 3.13). In einer gesonderten Funktion wird so der pixelgenaue Startpunkt für das Nährungsverfahren festgelegt. Darauf folgt die Bestimmung der Nullstelle der ersten Ableitung mittels Newtonschem Näherungsverfahren und die Rückgabe der Kantenortkoordinaten.

Implementierung der Spline-Interpolation

Die mathematischen Grundlagen für die Interpolation mit natürlichen Splines werden in Unterabschnitt 3.5.2 beschrieben. Der erste Schritt ist die Aufstellung des Gleichungssystems (3.20). Es wird mit Hilfe einer vorhandenen QID-Funktion `MatrixInversion` gelöst. Der Lösungsvektor b_i wird danach mit $b_0 = b_n = 0$ vervollständigt. Die Koeffizienten a_i und c_i werden entsprechend der Formeln in (3.21) ermittelt. Auch bei den Splines ist es wichtig, den Ort des Maximum grob zu bestimmen. Die Polynome dritten Grades sind nur innerhalb ihres Intervalls

gültig. Wird für das Näherungsverfahren ein ungünstiger Startpunkt gewählt, kann es passieren, dass ein ungültiges Maximum außerhalb des Intervalls eines Splines gefunden wird. Das pixelgenaue Maximum ist ein Stützpunkt zwischen zwei Splines. Es muss also zusätzlich geprüft werden, auf welcher Seite sich das Spline-Intervall befindet, das das gesuchte Maximum enthält. Dazu wird bei der Näherung des subpixelgenauen Kantenortes überprüft, ob der Ort aus dem gültigen Intervall herausläuft. Dementsprechend wird das Näherungsverfahren gegebenenfalls in das andere Intervall „verschoben“. Es wird wieder die subpixelgenaue Kantenortsbestimmung nach dem Newtonschen Näherungsverfahren angewandt. Zum Schluss erfolgt die Rückgabe der Kantenortkoordinaten.

4.5.2 Übersicht zu den Experimenten für das neue Verfahren zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in Differenzvektor-Kantenbildern

In den Untersuchungen zu dem neuen Verfahren zur Kantenortsbestimmung soll mit den verschiedenen Versuchsreihen geklärt werden:

- welche der Ansätze aus Abschnitt 3.5 die besten Resultate liefern,
- welche Genauigkeiten vom dem neuen Verfahren zu erwarten sind und
- wie das neue Verfahren im Vergleich zu etablierten Kantenortsbestimmungen für Ein-Kanal-Bilder abschneidet.

Für die Untersuchungen, ob das Verfahren den gewünschten Kantenort liefert, besteht prinzipiell das gleiche Problem wie bei den Untersuchungen in Unterabschnitt 4.4.4. Ohne ein etabliertes Referenzverfahren kann in realen Kamera-Bildern keine Soll-Position ermittelt werden. Es mangelt an der Vergleichbarkeit. Um dieses Problem zu umgehen, wird die absolute Kantenposition nur in den Versuchen beurteilt, in denen eine Kanten-Soll-Position bekannt ist. Dafür werden die in Unterabschnitt 4.1.2 beschriebenen synthetischen Bilder genutzt. Bei diesen Bildern ist der Kantenort in den Originalbildern vorgegeben. In Abschnitt 4.4 wurde bereits an einigen Beispielen gezeigt, dass der Ort des Maximalwertes im gefilterten Bild dem Kantenort entspricht. Die Versuchsreihen umfassen dabei nicht nur ideale synthetische Bilder, sondern auch Bilder, die mit künstlichem Rauschen versehen wurden.

In den Versuchen mit realen Kamerabildern ist eine Beurteilung der absoluten Kantenposition nicht sinnvoll. Bewertet wird nur die relative Lage von Kanten zueinander und Wiederholgenauigkeiten bei mehrfacher Messung.

4.5.3 Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in synthetischen Vektordifferenz-Kantenbildern

In den synthetischen Kantenbildern ist eine Soll-Kantenposition gegeben. Das ist ein Vorteil, weil deshalb kein Vergleichsverfahren für diese Versuche herangezogen werden muss. Ein Nachteil bei der Beurteilung ist, dass bestimmte Vorverarbeitungsschritte nötig sind (siehe Abbildung 4.28). Diese Einflüsse gehen direkt in die Ergebnisse ein. Eine Beurteilung des neuen Kantenortskriteriums allein ist deshalb nicht direkt möglich.

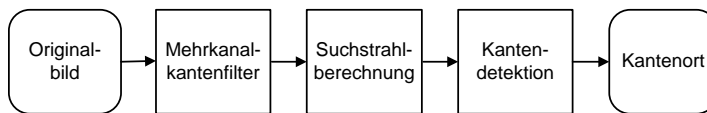


Abbildung 4.28: Arbeitsschritte bei der Kantenortsbestimmung

Die drei favorisierten mathematischen Methoden zur Abschätzung des Grauwertverlaufs in den gefilterten Bildern (siehe auch Abschnitt 3.5) werden in den Versuchen mit verschiedenen Szenarien konfrontiert – Verschiebung, Verdrehung, Rauschen – und die Unterschiede ihrer absoluten Kantenortsbestimmung und deren Wiederholbarkeit überprüft.

Im ersten Versuch werden die synthetischen Bilder mit unterschiedlichen Winkeln der Kante im Bild genutzt (siehe Abbildung 4.29). Es werden 16 Bilder mit je 3° Winkeländerung von 0° bis 45° verwendet.

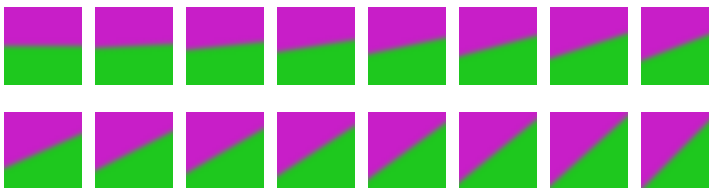


Abbildung 4.29: Synthetische Bilder in verschiedenen Drehlagen

Die Antastung der Kante erfolgt immer mit Suchstrahlen, die orthogonal zur Kante ausgerichtet sind, siehe Abbildung 4.30. Über einen 20 Pixel breiten Bereich werden 100 Suchstrahlen gelegt.

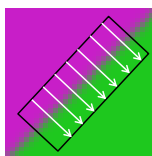


Abbildung 4.30: Schematische Darstellung der Lage der Suchstrahlen

Abszisse: Suchstrahlnummer

0–100, entspricht 20 Pixel im Bild

Ordinate: Abweichung zwischen ermitteltem Kantenort und Kanten-sollposition in Suchstrahlrichtung (in Pixel)

Legende:

◆ Dynamischer Schwellwert im grünen Kanal (Grauwertstufe 200 zu 30) (a)

■ Approximation mit Polynom 4. Grades (b)

▲ Spline-Interpolation (c)

● Approximation mit Gauß-Funktion (d)

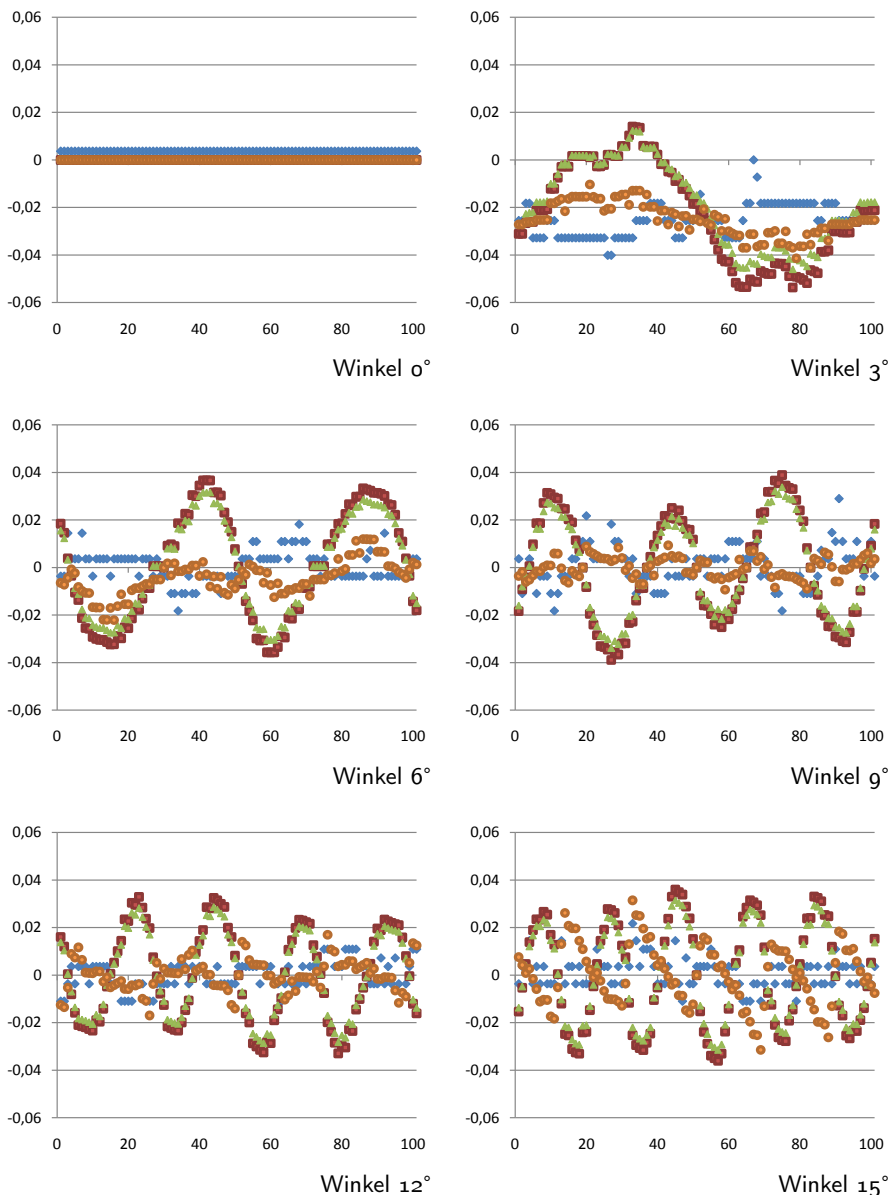


Abbildung 4.31: Ermittelte Kantenorte in synthetischen Bildern, Kante unter verschiedenen Winkeln im Bild

Bei dieser Testserie fällt auf: Beim rastersynchronen Fall (0°) und beim quasi-rastersynchronen Fall (45°) treten bei allen Verfahren so gut wie keine Abweichungen zur Sollposition auf. Bei kleinen Winkeln treten Abweichungen auf, die entlang der Kanten einen schwingungsartigen Verlauf haben. Diese Schwingung wird mit zunehmendem Winkel hochfrequenter, die Amplitude ändert sich über die Winkel kaum. Amplitude und Phase sind für die verschiedenen Verfahren unterschiedlich. Besonders ausgeprägt ist das Schwingungsverhalten bei der Approximation mit Polynomen vierten Grades (b) und bei der Spline-Interpolation (c). Bei Approximation mit Gauß-Funktion (d) und dynamischem Schwellwert (a) ist das Schwingverhalten nicht so stark ausgeprägt, aber vorhanden. Die Amplitude der Abweichungen ist bei (b) und (c) bei kleineren Winkeln am größten. Mit zunehmendem Winkel wird sie geringer. Bei (d) ist das Verhalten eher umgekehrt, mit zunehmendem Winkel werden die Abweichungen größer. Das Schwingungsverhalten zeigt sich bei allen Verfahren, sogar bei (a), wenn auch in geringerem Ausmaß. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Schwingung nichts mit den neuen Kantenortskriterien oder dem Differenzvektor-Kantenfilter zu tun hat. Eine Erklärung wäre, dass es sich um Artefakte aus vorangegangenen Verarbeitungsschritten der Bildverarbeitungskette handelt. Als Schlussfolgerung kann daraus gewonnen werden: (d) geht mit den Artefakten besser um, als (b) und (c). Bei kleinen Winkeln sind die bei der *Approximation mit Gauß-Funktion* (d) entstehenden Abweichungen auf ähnlichem Niveau wie bei (a). Bei mittleren und größeren Winkeln zeigt das Referenzverfahren *Dynamischer Schwellwert mit photometrischer Mitte* (a) die geringsten Abweichungen.

Dass die Schwingung bei 3° nicht um die Sollkantenposition stattfindet, sondern um $-0,02$ Pixel verschoben ist, lässt sich in den Versuchen mit reellen Kamerabildern nicht reproduzieren. Diese Abweichung ist nicht abhängig davon, ob die Kante von hell nach dunkel oder umgekehrt angetastet wird. Wahrscheinlich handelt es sich um Diskretisierungsfehler, die in dem Programm für die Messung der synthetischen Bilder auftreten. Die Abweichung stammt nicht von der Kantenortsbestimmung selbst.

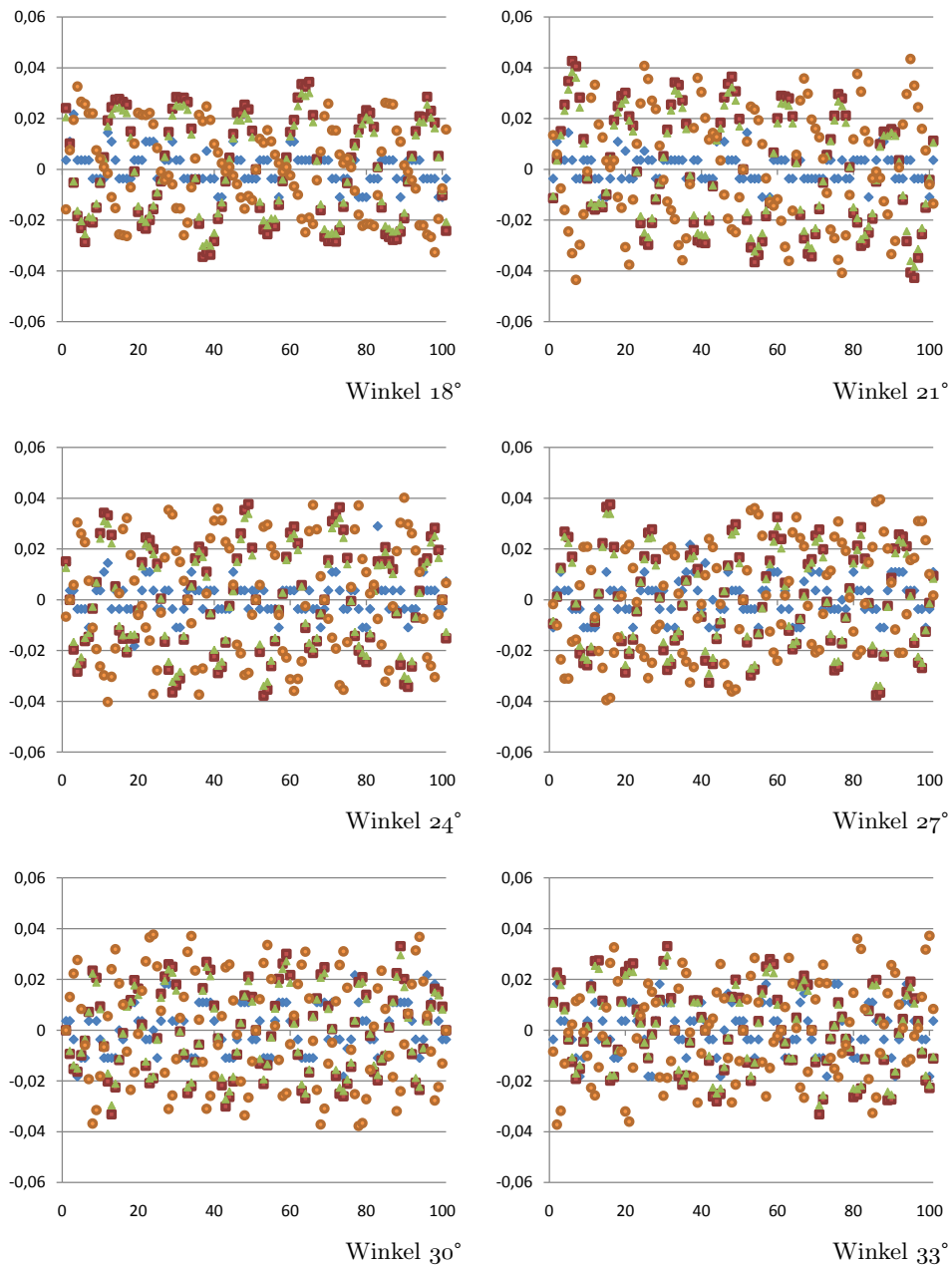


Abbildung 4.31: Ermittelte Kantenorte in synthetischen Bildern, Kante unter verschiedenen Winkeln im Bild (Fortsetzung)

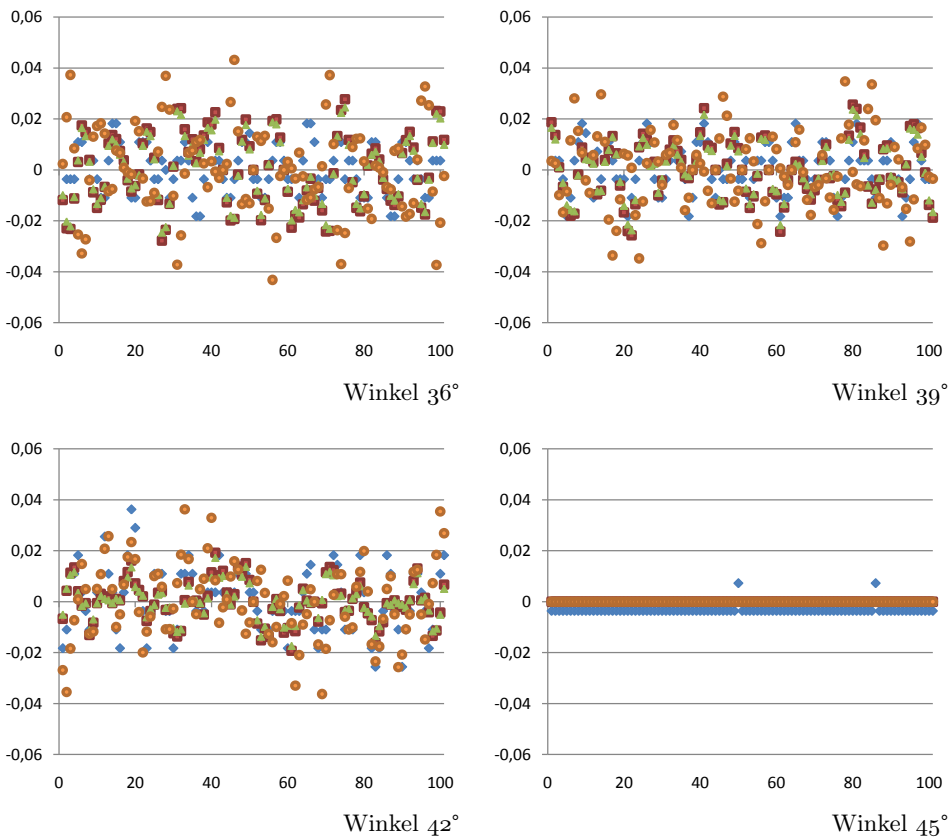


Abbildung 4.31: Ermittelte Kantenorte in synthetischen Bildern, Kante unter verschiedenen Winkeln im Bild (Fortsetzung)

Das beobachtete Schwingungsverhalten tritt aber, wie in der Beschreibung der experimentellen Ergebnisse noch gezeigt wird, auch bei reellen Kamerabildern auf. Da das Schwingungsverhalten bei kleinen Winkeln der Kante gegenüber dem Pixelraster am ausgeprägtesten ist und in diesen Fällen auch der Suchstrahl unter einem kleinen Winkel zum Pixelraster liegt, liegt die Vermutung nahe, dass die Interpolation des Suchstrahls zu diesem Effekt beiträgt. In Abbildung 4.32 sind die Ergebnisse eines Versuches dargestellt, bei dem die Kante im Bild rastersynchron liegt sowie auch die Suchstrahlen orthogonal zur Kante ausgerichtet sind, Start- und Endpunkte des Suchstrahls aber im Subpixelbereich in Suchstrahlrichtung verschoben werden. Die Verfahren (b) und (c) reagieren wie bei den Versuchen zuvor am stärksten. Der Unterschied zwischen beiden ist jedoch nicht so groß. Zudem schneidet (d) jetzt am besten ab, besser als (a). Bei den vorangegangenen Versuchen war eher (a) im Vorteil. Das Verfahren (d) hat insgesamt die geringsten Abweichungen durch die Artefakte, die bei der Berechnung des Suchstrahls entstehen. Den Ergebnissen dieser Messung zufolge trägt die Suchstrahlberechnung zu dem Schwingungsverhalten bei. Vollständig erklären lässt es sich damit

aber nicht. Die Abweichungen bei der Suchstrahlverschiebung zeigen ähnliche Ergebnisse wie die Versuche der Kante mit verschiedenen Winkeln. Die einzelnen Verfahren schneiden leicht unterschiedlich ab. Noch bessere Ergebnisse als das Referenzverfahren *Dynamischer Schwellwert mit photometrischer Mitte* (a) sind mit der *Approximation mit Gauß-Funktion* (d) erreicht wurden.

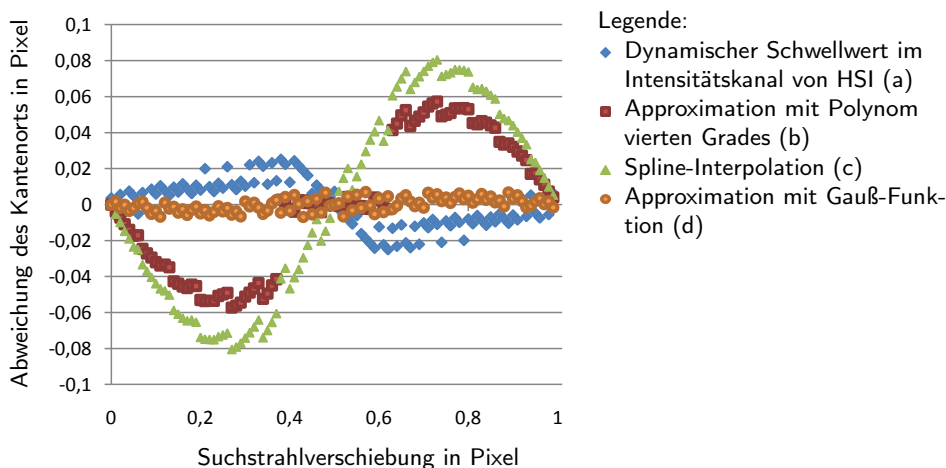


Abbildung 4.32: Ergebnisse der Suchstrahlverschiebung, Kantenwinkel 0°

Zusätzlich wurde das Verhalten der Verfahren gegenüber zufälligen Abweichungen des Grauwertes in den synthetischen Bildern (künstliches Rauschen) untersucht. Das Rauschen ist dabei normalverteilt und alle Pixel sind unabhängig voneinander. Es konnten keine statistischen Auffälligkeiten festgestellt werden. Die resultierenden Abweichungen der gefundenen Kantenorte bestehen den Test auf Normalverteilung problemlos. Bei einer Mittelung über viele verrauschte Bilder stellen sich die gleichen Ergebnisse wie bei den rauschfreien Bildern ein.

4.5.4 Subpixelgenaue Kantenortsbestimmung in reellen Vektordifferenz-Kantenbildern

Die vorangegangenen Experimente sind zwar gut geeignet, um systematische Probleme der Algorithmen aufzudecken, sie sind aber nur bedingt für das Verhalten in der Praxis aussagekräftig. Bei reellen Bildverarbeitungssystemen gibt es mehr Einflüsse auf das digitale Bild als im Modell der synthetischen Bilder berücksichtigt wurden. Deshalb sind zu reellen Kamerabildern weitere Experimente nötig.

Andererseits sind Werte der Messungen an reellen Bildern etwas anders auszuwerten als die der synthetischen Bilder. Da es keine Soll-Kantenposition im Bild gibt, können nur Abstände zweier Kantenorte dargestellt und verglichen werden.

Die Auffälligkeiten unter bestimmten Winkeln können nicht akkurat mit realen Kamerasystemen überprüft werden. Da die Prüfobjekte im Bild nicht mit definierten Winkeln gegenüber dem Pixelraster abgetastet werden können, sind nur qualitative Aussagen möglich. Es können aber gut quantitative Aussagen über Größenverhältnisse getroffen werden. Statistische Analysen von Wiederholmessungen sind ebenfalls möglich.

Für die Versuche werden verschiedene Strukturen eines Auflicht-Messobjekts verwendet. Es ist in Abbildung 4.2b dargestellt und in Unterabschnitt 4.1.1 beschrieben. Abbildungen der angetasteten Strukturen finden sich zusätzlich jeweils bei den Diagrammen der Messergebnisse.

Es werden zwei Strukturen in jeweils zwei Lagen gemessen. Einmal ist die Ausrichtung fast rastersynchron, eine weitere Messung erfolgt leicht verdreht. Zuerst wird die Lage des Messobjektes grob bestimmt und ein Werkstückkoordinatensystem (WKS) angelegt, siehe Abbildung 4.33. Anhand des WKS werden die Start- und Endpunkte der Suchstrahlen so gelegt, dass sie möglichst orthogonal zu den Kanten des Objektes liegen. Ausgegeben werden die Abstände von zwei Kantenorten entlang einer Gerade, die den zwei dazugehörigen Suchstrahlen entspricht.

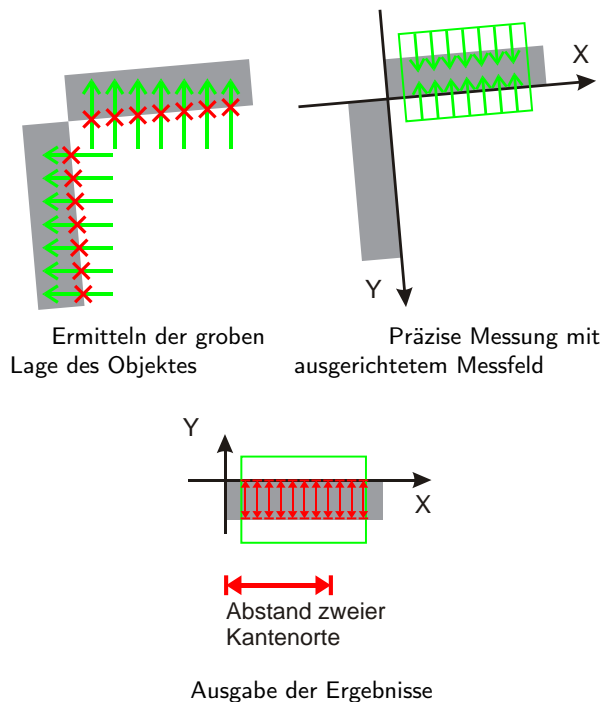


Abbildung 4.33: Vorgehensweise bei den Messungen

Es gibt zwei verschiedene Strukturen, an denen diese Messung durchgeführt wird. Bei einer sind die „Balken“ als Chrom-Rechtecke ausgeführt (Objekt positiv), bei

der anderen sind die Strukturen rechteckige Löcher in der Chromschicht (Objekt negativ).

Das Objekt, das als positive Chromstruktur auf Glas ausgeführt ist, hat eine Besonderheit. Die Struktur ist auf einer der Seiten des Rechtecks keine Gerade. Wegen eines Produktionsfehlers gibt es Stufen in der Kante. In Abbildung 4.35 ist eine Aufnahme der Stufe dargestellt, die mit einem Laser-Scanning-Mikroskop aufgenommen wurde. Die Stufe ist etwa $1,3\text{ }\mu\text{m}$ groß. Damit ist sie bei dem gewählten Abbildungsmaßstab nur ca. 0,2 Pixel groß, trotzdem sollte sie in den Messergebnissen gut zu erkennen sein.

Messobjekt: „Negative“ Rechteckchromstruktur auf Glassubstrat in zwei Winkellagen.



a Gerade im Bild
(90,0322°)



b Schräg im Bild
(85,0942°)

Abszisse: Nummer der Gerade (zwei Suchstrahlen) 0–100, entspricht 100 Pixel Breite im Bild

Ordinate: Mittlerer Abstand der zwei Kantenorte entlang einer Gerade über 100 Bilder (in Pixel)

Legende:

- ◆ Dynamischer Schwellwert im roten Kanal
- Dynamischer Schwellwert im grünen Kanal
- ▲ Dynamischer Schwellwert im blauen Kanal

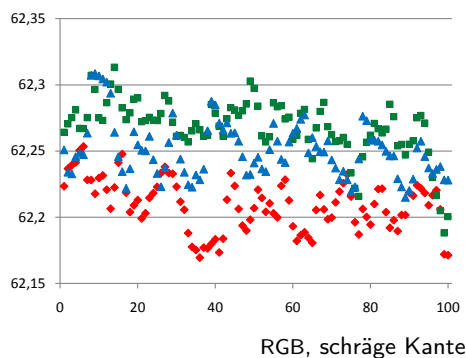
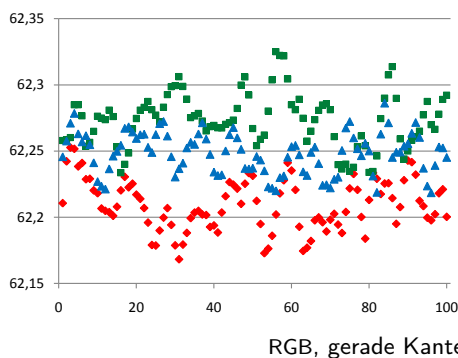


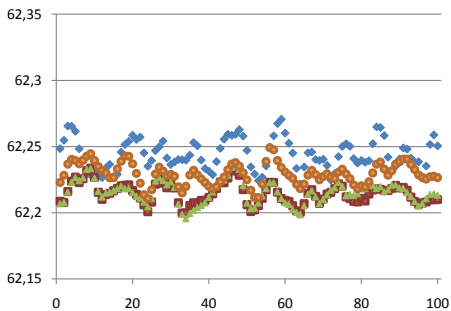
Abbildung 4.34: Ergebnisse von Messungen in realen Kamerabildern, Messobjekt: Negativ

Abszisse: Nummer der Gerade (zwei Suchstrahlen) 0–100, entspricht 100 Pixel Breite im Bild

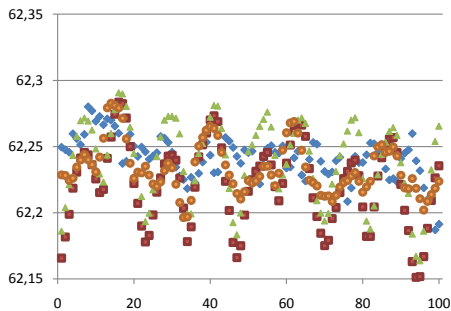
Ordinate: Mittlerer Abstand der zwei Kantenorte entlang einer Gerade über 100 Bilder (in Pixel)

Legende:

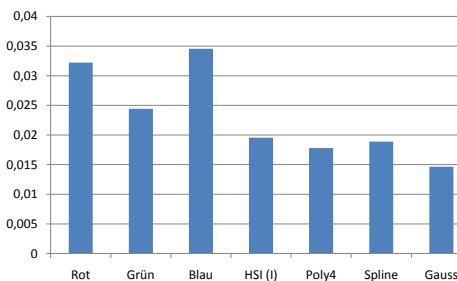
- ◆ Dynamischer Schwellwert im Intensitätskanal von HSI (a)
- Approximation mit Polynom vierten Grades (b)
- ▲ Spline-Interpolation (c)
- Approximation mit Gauß-Funktion (d)



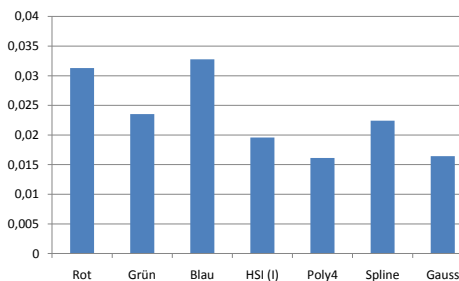
gemittelte Abstände gerade



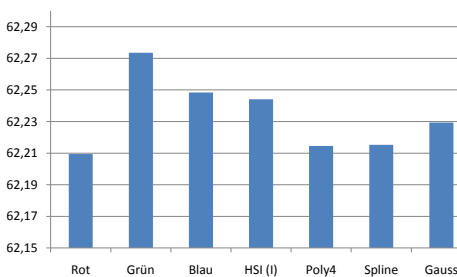
gemittelte Abstände schräg



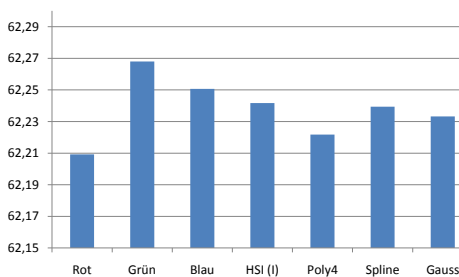
Standardabweichungen gerade



Standardabweichungen schräg



Mittelwerte über alle Suchstrahlen



Mittelwerte über alle Suchstrahlen

Abbildung 4.34: Ergebnisse von Messungen in realen Kamerabildern, Messobjekt: Negativ (Fortsetzung)

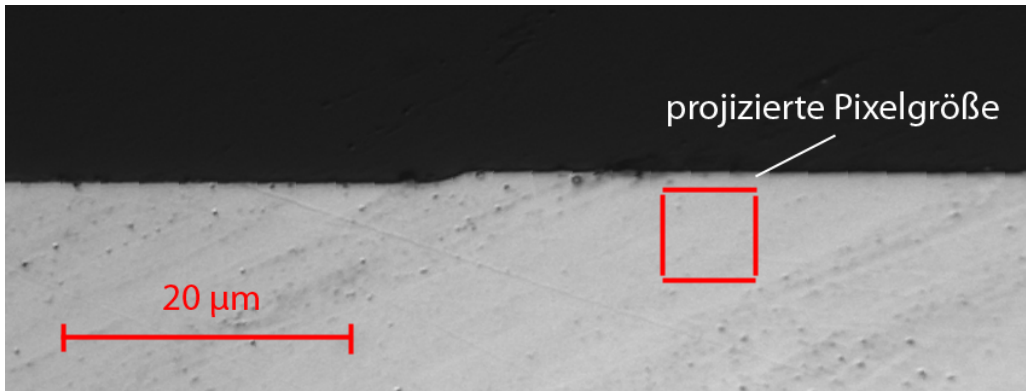
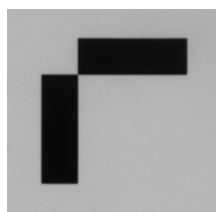
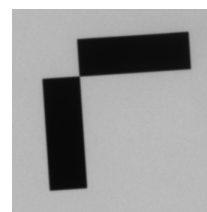


Abbildung 4.35: Defekt in der gemessenen Kante

Messobjekt: „Positive“ Rechteckchromstruktur auf Glassubstrat in zwei Winkellagen.



a Gerade im Bild
(90,0536°)



b Schräg im Bild
(86,1962°)

Abszisse: Nummer der Gerade (zwei Suchstrahlen) 0–100, entspricht 100 Pixel Breite im Bild

Ordinate: Mittlerer Abstand der zwei Kantenorte entlang einer Gerade über 100 Bilder (in Pixel)

Legende:

- ◆ Dynamischer Schwellwert im roten Kanal
- Dynamischer Schwellwert im grünen Kanal
- ▲ Dynamischer Schwellwert im blauen Kanal

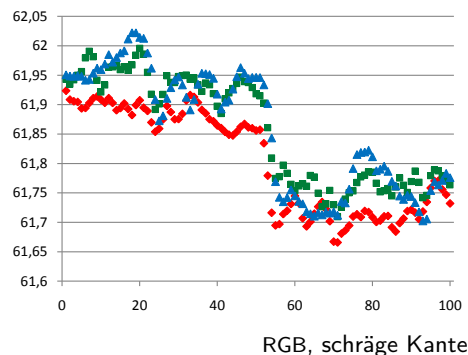
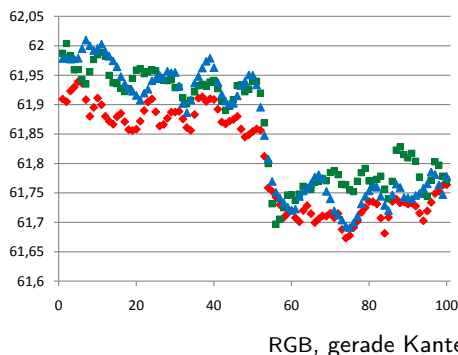


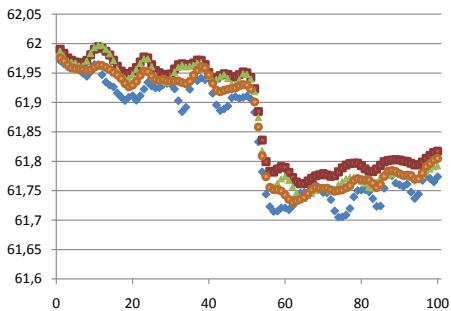
Abbildung 4.36: Ergebnisse von Messungen in realen Kamerabildern, Messobjekt: Positiv

Abszisse: Nummer der Gerade (zwei Suchstrahlen) 0–100, entspricht 100 Pixel Breite im Bild

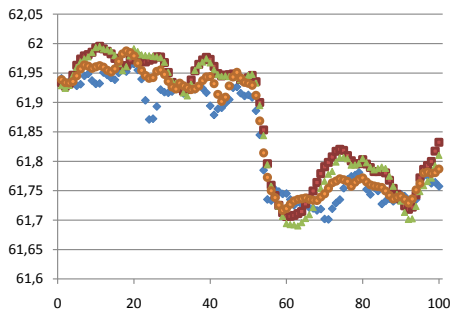
Ordinate: Mittlerer Abstand der zwei Kantenorte entlang einer Gerade über 100 Bilder (in Pixel)

Legende:

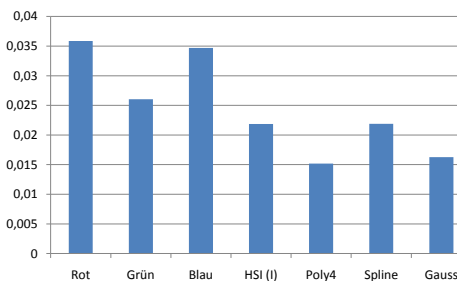
- ◆ Dynamischer Schwellwert im Intensitätskanal von HSI (a)
- Approximation mit Polynom vierten Grades (b)
- ▲ Spline-Interpolation (c)
- Approximation mit Gauß-Funktion (d)



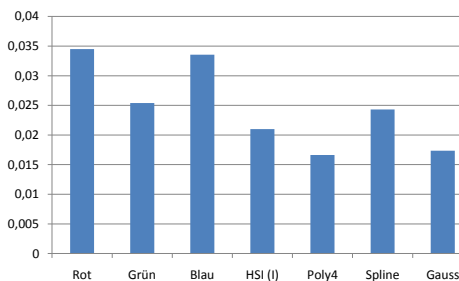
gemittelte Abstände gerade



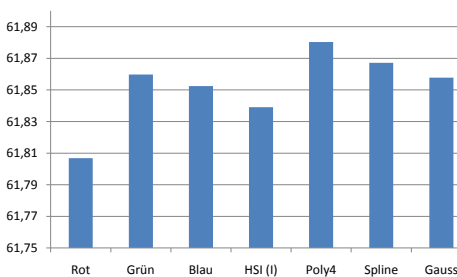
gemittelte Abstände schräg



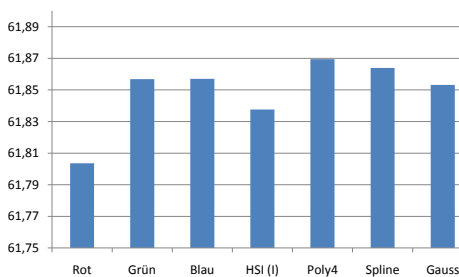
Standardabweichungen gerade



Standardabweichungen schräg



Mittlerwerte über alle Suchstrahlen



Mittlerwerte über alle Suchstrahlen

Abbildung 4.36: Ergebnisse von Messungen in realen Kamerabildern, Messobjekt: Positiv (Fortsetzung)

In Abbildung 4.34 und Abbildung 4.36 sind in den Diagrammen für die Kanäle Rot, Grün und Blau unterschiedliche gemessene Größen der Strukturbreite zu erkennen. Die Erklärung dafür sind chromatische Querfehler der verwendeten abbildenden Optik. Obwohl diese Fehler bei dem hochwertigen Objektiv sehr gering sind, können

sie nachgewiesen werden. Die Unterschiede betragen weniger als 0,1 Pixel, was ca. 0,65 μm entspricht. Damit bleiben sie unter den Herstellerangaben von $\pm 1 \mu\text{m}$.

Es gibt keine großen Differenzen zwischen der fast rastersynchronen Ausrichtung und der gedrehten Lage des Objektes. Bei Messungen in R, G und B ist kein signifikanter Unterschied zwischen der Verteilung der Punkte zu erkennen. Das Schwingungsverhalten bei kleinen Winkeln (siehe Unterabschnitt 4.5.3), das bei den synthetischen Bildern beobachtet werden kann, ist in den Ergebnissen der Einzelkanäle kaum zu erkennen.

Bei den Messungen im gefilterten Bild mit den neuen Kantenortskriterien entsteht ein anderes Ergebnis. Das Schwingungsverhalten ist hier deutlich zu erkennen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die geringere Auflösung der Einzelkanäle dazu führt, dass das Schwingverhalten weniger stark auftritt bzw. in den größeren zufälligen Abweichungen „untergeht“. Besonders großen Einfluss hat es, wie auch bei den synthetischen Bildern, bei den Verfahren (b) und (c).

Die Balkendiagramme in Abbildung 4.34 und Abbildung 4.36 zu den mittleren Standardabweichungen der Kantenposition auf den Einzelsuchstrahlen zeigen bei allen vier Objektszenen, verglichen mit den Ergebnissen für RGB, geringere Werte für die neuen Verfahren. Beim Vergleich von (a) im Intensitätskanal mit den neuen Verfahren ((b), (c), (d)) schneiden (b) und (d) immer besser ab, während die Ergebnisse für (c) durchwachsen sind. Das Schwingverhalten von (d) ist aber weniger stark ausgeprägt als von (b). Insgesamt schneidet (a) im Intensitätskanal und (d) in den Kantenbildern in etwa gleich gut, wobei (d) in einigen Fällen sogar „glattere“ Kantenortsverläufe erzeugt. Die neuen Verfahren (b) und (c) weisen nur geringfügig schlechtere statistische Ergebnisse auf, es liegt aber die Vermutung nahe, dass das Schwingverhalten nicht dem tatsächlichen Kantenverlauf entspricht.

Die beiden unteren Diagrammen zeigen die Kantenposition, wenn über alle Werte aller Suchstrahlen einer Messung gemittelt wird. Diese Diagramme geben einen Anhaltspunkt, wie groß die Struktur mit dem Verfahren gemessen werden würde. Alle Bilder der jeweiligen Serie sind unter identischen Bedingungen entstanden. Die Bilder, in denen die Kantenorte bestimmt werden, sind für alle Verfahren dieselben. Dass sich die Ergebnisse für R, G und B unterscheiden, ist, wie bereits erwähnt, mit Farbquerfehlern zu erklären. Schwerer ist zu beurteilen, welches Maß für den Abstand der Kantenorte in einem kombinierten Bild, wie z. B. den Intensitätskanal aus HSI oder das gefilterte Bild, das richtige ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass in einem kombinierten Kanal der Wert innerhalb der Spannweite der drei Werte von RGB liegen sollte. Diese Bedingungen erfüllen sowohl (a) als auch (d) in diesen Versuchsreihen immer, (b) und (c) liegen bei den Messungen am zweiten Objekt (Positiv-Chromstruktur) nicht innerhalb der Spannweite.

Für eine Messung in einem hochpräzisen Messsystem auf Basis des Ansatzes in einem kombinierten Kanal, wird es nötig sein, die Verzeichnungen (insb. Farbquerfehler) der RGB-Kanäle zu korrigieren, bevor eine HSI-Transformation o. ä.

erfolgen kann. Eine Kalibrierung der Größen ist mittels des kombinierten Kanals möglich. Für Kanten, die nicht in allen Kanälen gleiche Kontraste haben, führt sie aber zu unerwarteten Abweichungen. Diese Einschränkung gilt ebenfalls für den Differenzvektor-Kantenfilter. Er funktioniert ohne eine entsprechende Korrektur der Farbquerfehler nur dann fehlerfrei, wenn die Kontraste einer Kante in allen Kanälen gleich sind.

Die Versuche mit reellen Kamerabildern liefern insgesamt die gleichen Ergebnisse wie die Versuche an synthetischen Bildern. Bei Kanten, die im Intensitätskanal einen guten Kontrast aufweisen, schneiden die etablierte Methode, der „Dynamische Schwellwert“ und das neue Verfahren basierend auf dem Kantenfilter und mit der Kantensortsbestimmung „Approximation mit Gauß-Funktion“ etwa gleich gut ab. Der Vorteil der neuen Methode gegenüber der etablierten ist, dass Kantensortsbestimmung in Mehrkanalbildern durchgeführt werden kann, auch wenn kein guter Kontrast mehr in einem Einzelkanal vorhanden ist. Solange der Differenzvektor-Kantenfilter Kontraste an Kantenübergängen detektiert, wird dieses Verfahren nutzbar sein. Aus den drei neuen zur Auswahl stehenden Kantensortskriterien liefert die „Approximation mit Gauß-Funktion“ die besten Ergebnisse. Die Interpolation mittels Splines und die Approximation mit Polynomen vierten Grades schneiden hier schlechter ab.

4.5.5 Direkter Vergleich von Ein-Kanal- mit CFA-Kamera

Eine weitere Frage, die mit Experimenten beantwortet werden soll, ist das Verhalten des neu vorgeschlagenen Systems aus CFA-Kamera mit CHA Demosaiking und Differenzvektor-Kantenfilter im direkten Vergleich zu einem konventionellen System mit panchromatischem Sensor und der Auswertung nur eines Grauwertkanals. Dazu wurde dasselbe Messobjekt mit zwei verschiedenen Kamerasystemen erfasst und mit der jeweils passenden Bildverarbeitung ausgewertet (siehe Abbildung 4.37). Möglichst viele der Komponenten, z. B. Beleuchtung und Objektiv, sind bei den beiden Aufbauten identisch.

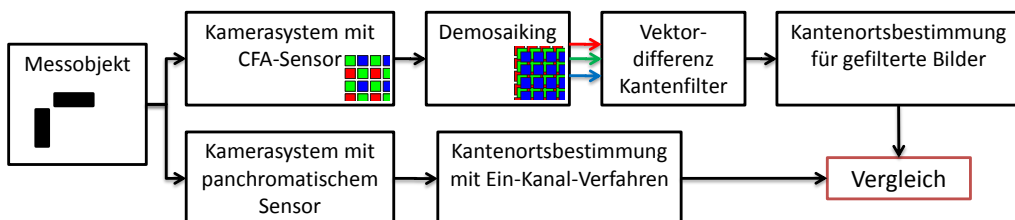


Abbildung 4.37: Schematische Darstellung der Vergleichsmessung von Ein-Kanal- und Drei-Kanal-System

Bei den Messungen ist zu beachten, dass es sehr viele unterschiedliche Parameter bei den verschiedenen Systemen gibt. Es wurde versucht, die Bedingungen wei-

testgehend gleich für beide System zu gestalten, damit die Ergebnisse vergleichbar sind:

- Einstellung beider Kameras mit identischen Parametern: Verstärkung, Belichtungszeit
- Alle drei Kanäle der RGB-LED-Beleuchtung bei beiden Systemen aktiv
- Etwa gleiche Helligkeiten für die drei Beleuchtungskanäle bezogen auf den Dynamikumfang des Bildes,
für CFA: ca. Grauwert 200 im jeweiligem Kanal,
für panchromatische Kamera: jeweiliger Anteil zur Gesamthelligkeit ca. Grauwert 67
- Einsatz desselben Objektivs
- Einsatz desselben Objekts, Messung an gleichen Merkmalen und möglichst in gleicher Position

Es gibt viele Parameter der Systeme, die sich unterscheiden, auf die kein Einfluss genommen werden kann, bzw., die für den Vergleich wesentlich sind:

- *Sensorlage relativ zum optischen System*: Da es sich um verschiedene Kameras in verschiedenen Gehäusen handelt, ist die relative Sensorlage unterschiedlich. Es bedeutet, dass die Abbildungsmaßstäbe unterschiedlich sind, dass es leichte Unterschiede in den Abbildungsfehlern gibt und dass nicht an der gleichen Position im Bild gemessen wird.
- *Filterwirkung durch zusätzliche Bildverarbeitungsschritte*: Sowohl das Demosaiking als auch der Kantenfilter reduzieren den Informationsgehalt des Bildes. Dabei könnten Informationen entfernt werden, die bei der Messung stören oder solche, die nützlich für Messungen wären.
- *Spektrale Empfindlichkeit der Sensoren*: Trotz der möglichst gleichen Wichtung der Kanäle ist nicht sichergestellt, dass die Farbfehler der Optik in beiden Systemen gleichen Einfluss haben. Besonders bei der panchromatischen Kamera gibt es keine Kontrolle, welchen Anteil die jeweilige Beleuchtungsfarbe hat, sobald alle drei gleichzeitig eingeschaltet werden.

Aus diesen Vorüberlegungen ergibt sich, dass die folgenden Diagramme weit mehr als nur die Einflüsse der unterschiedlichen Kantenortsbestimmung widerspiegeln.

Das verwendete Messobjekt ist das in Unterabschnitt 4.5.4 beschriebene, das eine Stufe an einer der Strukturen aufweist. Die Messungen der Größe der Stufe kann für eine zusätzliche Beurteilung genutzt werden.

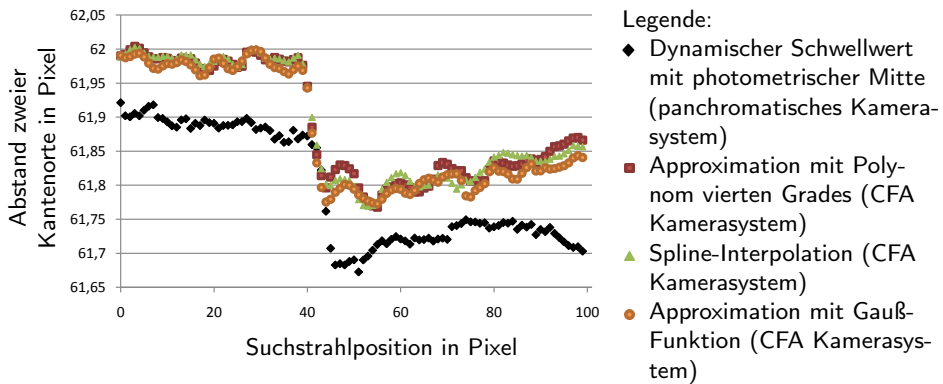


Abbildung 4.38: Vergleich panchromatische Kamera und CFA-Kamera – Mittelwerte über 100 Bilder

Eine objektive Auswertung der Daten lässt sich nur in der Einheit Pixel durchführen, da diese Systeme nicht kalibriert sind. Um aber eine Vorstellung davon zu bekommen, in welcher Größenordnung die Messung stattfindet, folgt eine Abschätzung der metrischen Größen. Das verwendete Objektiv hat einen Abbildungsmaßstab von 1:1. Damit ergibt sich die objektseitig projizierte Größe der Pixel gleich der Größe der Pixel auf dem Sensor. Ein Pixel entspricht ca. $6,45\ \mu\text{m}$. Das bedeutet, dass die gemessene Stufe etwa $1,3\ \mu\text{m}$ ($0,2$ Pixel) groß ist. Die Standardabweichungen der verschiedenen Verfahren liegen zwischen $160\ \text{nm}$ ($0,025$ Pixel) und $90\ \text{nm}$ ($0,014$ Pixel).

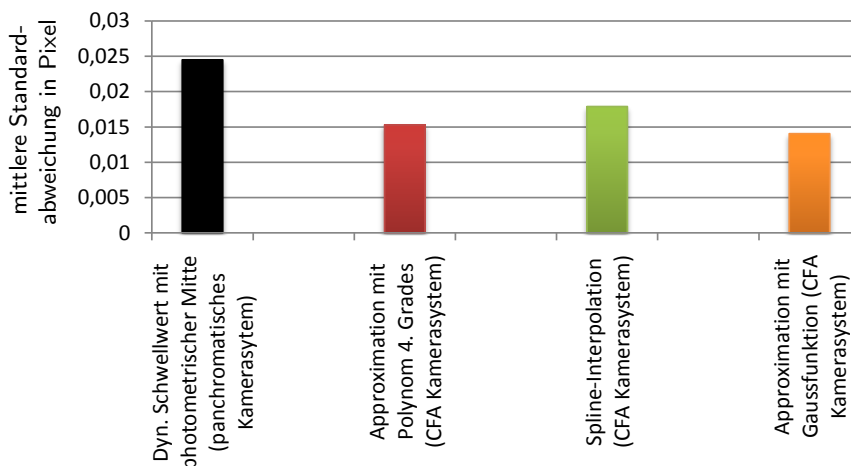


Abbildung 4.39: Vergleich panchromatische Kamera und CFA-Kamera – Standardabweichungen über 100 Bilder gemittelt über 100 Suchstrahlen

Wie in Abbildung 4.38 zu sehen ist, haben die unterschiedlichen Abbildungsmaß-

stäbe den größten Einfluss auf den gemessenen Abstand. Der Defekt des Objektes (in Abbildung 4.35 dargestellt) ist bei beiden gut zu erkennen und wird auch etwa gleich groß gemessen. Die leicht unterschiedliche Charakteristik der gemessenen Kanten-Verläufe lässt sich mit dem in Unterabschnitt 4.5.3 beschriebenen Schwingungsverhalten erklären. Die Ausrichtung der Kante zum Sensorraster ist leicht unterschiedlich: $89,6^\circ$ (panchromatische Kamera) zu $91,1^\circ$ (CFA-Kamera). Hinzu kommt, dass unterschiedliche Positionen im Bild zu unterschiedlichen lokalen Verzerrungen führen. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen zwei Systemen aber sehr gering. Zusätzlich ist interessant, dass die drei Verfahren für das CFA-System nur extrem geringe Unterschiede zeigen, obwohl auch hier jeweils eine neue Bildaufnahme erfolgte. Bei den Standardabweichungen (siehe Abbildung 4.39) zeigen sich größere Differenzen. Der *Dynamische Schwellwert* mit dem Subpixelkriterium *photometrische Mitte* aus den Daten der panchromatischen Kamera zeigt deutlich höhere Standardabweichungen als die *Approximation mit Gauß-Funktion* auf Basis der CFA-Kamera. Der Unterschied ist auch deutlich größer als bei vorangegangenen direkten Vergleichen, in denen alle Verfahren mit Bildern einer CFA-Kamera gearbeitet haben. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass die Filterwirkung des Demosaikings Informationen herausfiltert, die zu erhöhten Messunsicherheiten führen können. Gleichzeitig bringt die „lückenhafte“ Abtastung der Abbildung durch eine CFA-Kamera bei dieser Art von Messobjekt keine nennenswerten Nachteile. Bei anderen zu messenden Objekten kann es sich anders Verhalten. Die zwei Kantenortskriterien, die bereits bei verschiedenen Messungen Anfälligkeiten für schwingende Kantenorte zeigten, zeigen auch hier wieder ungleichmäßigere Ergebnisse. Die Standardabweichung schwankt stärker über die verschiedenen Suchstrahlen. Das gilt besonders für die *Spline-Interpolation*.

Die Kombination von CFA-Kameras mit den neuen Vorverarbeitungsschritten (CHA Demosaiking und Differenzvektor Kantenfilter) und dem Verfahren zur Kantenortsbestimmung mittels Approximation einer Gauß-Funktion schneidet sehr gut im Vergleich zu einem etablierten System ab. Das neue System erreicht bei den Standardabweichungen für die wiederholte Antastung sogar geringere Werte. Bei dem etablierten Verfahren könnten möglicherweise zusätzliche Filter zu besseren Ergebnissen führen.

4.5.6 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zur Kantenortsbestimmung in Differenzvektor-Kantenbildern

Von den drei untersuchten Verfahren zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in den gefilterten Bildern liefert die *Approximation mit Gauß-Funktion* die besten Ergebnisse. Dieses Verfahren ist in Versuchen mit synthetischen und reellen Kamerabildern den anderen beiden Methoden – der *Interpolation mit Splines* und der *Approximation mit Polynomen vierten Grades* – überlegen. Die *Approximation mit*

Gauß-Funktion ist weniger anfällig für Artefakte vorangegangener Bildverarbeitungsschritte. Die Kantenorte werden mit Abweichungen von weniger als $\pm 1/25$ Pixel bestimmt. Dieser Wert könnte wahrscheinlich weiter verbessert werden, wenn die Algorithmen der Suchstrahlberechnung optimiert werden würden.

Beim direkten Vergleich der Messungen von Strukturen mit den zwei unterschiedlichen Bildaufnahmesystemen – der panchromatische Kamera und der CFA-Kamera – lassen sich sehr gute Ergebnisse mit der Kombination aus dem CHA Demosaiking, dem Differenzvektor-Kantenfilter und der Kantenortsbestimmung durch *Approximation mit Gauß-Funktion* erreichen. Die Ergebnisse sind besser als die des Referenzmessverfahrens, der Kombination von einem Ein-Kanal-Bild mit der Kantenortssuche mittels dynamischen Schwellwerts mit dem Subpixelkriterium der photometrischen Mitte. Die Standardabweichungen bei dem System mit CFA Kamera sind ca. 40 % geringer als bei dem System mit panchromatischer Kamera (0,0245 zu 0,014 Pixel).

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Es ist sinnvoll, die Nutzung von Farb- bzw. Mehrkanalinformationen für Geometriemessungen voranzutreiben. Wenn geometrische Größen bestimmt werden sollen, sei es auch nur ein Teil des Aufgabenspektrums beim Einsatz eines Bildverarbeitungssystems, dann sollten alle verfügbaren Informationen für die Geometriemessung genutzt werden. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu zu leisten.

Nach der Erläuterung für Mehrkanal-Bildverarbeitung wichtiger Begriffe werden die Einflüsse der Hardware des Bildaufnahmekanals auf die Erscheinung des digitalen Bildes erklärt und verschiedene Modelle der Interpretation von Mehrkanalbildern beschrieben. Es wird auf unterschiedliche Kamerateypen zur Erzeugung von Mehrkanalbildern eingegangen, den Kameras mit CFA wird auf Grund ihrer Bedeutung ein Unterabschnitt gewidmet.

Kameras mit CFA haben zwei Eigenschaften, die einen größeren Einfluss auf die Messung geometrischer Größen erwarten lassen. Zum einen sind die Spektralbereiche der Kanäle nicht gut voneinander getrennt, zum anderen ist ein zusätzlicher Bildverarbeitungsprozess, das Demosaiking, bei diesem Sensortyp nötig. Für beide Aspekte sind zurzeit keine Methoden bekannt, die auf die Anforderungen der Messung geometrischer Größen optimiert sind.

Aktuell genutzte Verfahren und bekannte Möglichkeiten zur Kantenortsbestimmung in Ein- und Mehrkanalbildern werden beschrieben. Das betrifft sowohl die pixelgenaue als auch die subpixelgenaue Kantenortsbestimmung. Abgeschlossen wird das Kapitel zum *Stand der Technik* mit der Präzisierung der Aufgabenstellung, die Bildverarbeitung von Mehrkanalbildern für die Messung geometrischer zu optimieren oder neu zu konzipieren.

Das Kapitel zu den *theoretischen Untersuchungen* beginnt mit Untersuchungen zum Informationsgehalt in den verschiedenen, für diese Arbeit relevanten, digitalen Bildern.

Ein Ergebnis ist, dass mit steigender Anzahl der Kanäle die statistischen Abhängigkeiten zwischen den Grauwerten zunehmen und deshalb der Informationsgehalt nicht linear mit der Anzahl der Kanäle steigt. Trotzdem bringen zusätzliche Kanäle in der Regel auch einen höheren Informationsgehalt mit sich.

Das zweite Ergebnis ist, dass bei einer vom Bildinhalt unabhängigen Betrachtung Bilder von einem Sensor mit CFA keinen höheren Informationsgehalt tragen als vergleichbare Bilder von Sensoren ohne CFA. Wenn aber anzunehmen ist, dass auf Grund von unterschiedlichen Körperfarben der Objekte spektrale Unterschiede in der Bildintensitätsfunktion entstehen, kann die These aufgestellt werden, dass die Filter des CFA dazu führen, dass es geringere statistische Abhängigkeiten gibt und damit der Informationsgehalt höher ist.

In den theoretischen Untersuchungen zeigt sich darüber hinaus, dass für die Kanaltrennung bei CFA-Kameras der entscheidende Parameter, um Verbesserungen erzielen zu können, das Emissionsspektrum der Leuchte ist. Theoretisch ist ein Beleuchtungsspektrum optimal, bei dem die Spektralbereiche großer Überschneidung in den Empfindlichkeitsspektren des Sensors möglichst geringe Leistung im Emissionsspektrum der Lichtquelle haben. Gleichzeitig ist es von Vorteil, wenn die anderen Bereiche des Beleuchtungsspektrums gleichmäßig, voll und leistungsstark strahlen. Ein „volles“ Spektrum ist Voraussetzung für eine gute Wiedergabe des spektralen Verhaltens des Objektes (Farbwiedergabe).

Für die Rekonstruktion des Drei-Kanal-Bildes aus den Rohdaten der CFA-Kamera wird ein neues Verfahren vorgeschlagen, dessen theoretische Vorteile geringere Abweichungen bei den rekonstruierten Kantenorten sind. Der prinzipielle Ansatz dabei ist, eine gewichtsbierte Approximation zu verwenden und die Gewichtsfunktion über eine „Pixelverwaschungsfunktion“ zu definieren. Das neue Verfahren wird „Circular Homogeneity Approximation“ Demosaiking (CHA) genannt.

Für die Kantenortsbestimmung in Mehrkanaldaten mit kanalübergreifender Nutzung der Kanteninformationen wird ein zweistufiges Verfahren vorgeschlagen. Der Grund dafür ist eine bessere Integration der neuen Algorithmen in vorhandene Softwarestrukturen und die Möglichkeit der getrennten Bewertung der Wirkungsweise der neuen Algorithmen.

Zur Gewinnung der kanalübergreifenden Kanteninformationen wird ein neuer Filter untersucht, der auf einem vektoriellen Modell des Mehrkanalbildes basiert. Der Filter gewinnt die Kanteninformationen aus Differenzvektoren direkt benachbarter Pixel. Damit liefern auch solche Kanten ein Signal, deren entgegengesetztes Vorzeichen im Grauwertverlauf verschiedener Kanäle bei anderen Filtern zu einer Kompensation geführt hätte. Im Ergebnis des Differenzvektorfilters, einem Grauwertkantenbild, werden die Kanten durch „Lichtbänder“ repräsentiert. Der Ort des maximalen Grauwertes des Lichtbandes entspricht theoretisch der Originalkantenposition.

Zur Bestimmung des subpixelgenauen Kantenortes sind entsprechende Subpixelkantenortskriterien nötig. Etablierte Algorithmen sind dafür nicht optimal geeignet. Es werden drei neue Verfahren untersucht, um den Ort des Grauwertmaximums entlang eines Suchstrahls zu finden: Polynom-Approximation mit Polynomen vierter Grades, Spline-Interpolation und Approximation mit einer Gauß-Funktion.

Den theoretischen Untersuchungen zufolge sind alle drei geeignet, in den Bildern des Differenzvektor-Kantenfilters die Kantenorte zu bestimmen.

Im Kapitel zu diesen *experimentellen Untersuchungen* werden Experimente mit synthetischen und reellen Bildern vorgestellt und bewertet. Dabei wird das jeweilige Verfahren möglichst unabhängig von Einflüssen anderer Quellen (Hard- und Software) getestet.

Die Untersuchungen zur Kombination der CFA Kamera mit verschiedenen Lichtquellen führen zu dem Ergebnis, dass anorganische LEDs mit 3 LED-Chips in einem Gehäuse in der Praxis die beste Wahl unter den getesteten Optionen sind. Auch wenn ihre spektralen Eigenschaften nicht optimal sind, bieten sie große Vorteile beim praktischen Einsatz. Sie haben eine gute Effizienz, hohe Lichtleistung und lassen viel Freiheit bei der Leuchtenkonstruktion.

Eine gute Alternative ist die Kombination einer Breitbandlichtquelle mit einem besonderen Filter, der optimale spektrale Eigenschaften gewährleisten kann. Solche Filter sind jedoch keine Serienprodukte.

Die Untersuchungen zu den verschiedenen Demosaikingverfahren liefern das Ergebnis, dass das neue CHA Demosaiking anderen Demosaiking-Algorithmen überlegen ist, wenn die Kantenposition im rekonstruierten Bild höchste Priorität hat. Sind andere Aspekte wichtiger, wie zum Beispiel der Eindruck für den menschlichen Betrachter oder höchste Verarbeitungsgeschwindigkeit, sollten andere Verfahren vorgezogen werden.

Der Differenzvektor-Kantenfilter verhält sich in den durchgeführten experimentellen Untersuchungen an synthetischen Bildern wie erwartet. Der Kantenort im Originalbild entspricht dem Ort des maximalen Grauwertes im gefilterten Bild. Es zeigt sich aber auch, dass die etablierte Kantenortsbestimmung nicht gut geeignet ist, um in gefilterten reellen Bildern Kantenorte zu bestimmen. Zum Beispiel kann das Kriterium des „maximalen Anstiegs“ zwar angewendet werden, indem die zwei Flanken des Lichtbandes angetastet werden, der Ort des Maximums ist dann die Mitte zwischen den zwei Flankenpunkten. Es ergibt sich jedoch eine Abweichung vom Soll-Kantenort bei unterschiedlichen Anstiegen an den zwei Flanken. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der Filter in reellen Bildern wie erwartet arbeitet, was aber nicht direkt bewiesen werden kann. Daraus lässt sich ableiten, dass die neuen Verfahren zur Kantenortsbestimmung in den gefilterten Bildern nötig sind.

Bei der Beurteilung der neuen Kantenortsbestimmungsverfahren treten einige unerwartete Ergebnisse bei experimentellen Untersuchungen auf. Bei Versuchen mit synthetischen Bildern gibt es systematische Abweichungen, deren Ursache weder der Filter noch die Kantenortsbestimmung selbst ist. Es scheinen Einflüsse von Artefakten vorangegangener Bildverarbeitungsschritte zu sein. Die neuen Verfahren reagieren jedoch unterschiedlich stark auf diese Einflüsse. Die Approximation mit Gauß-Funktion zeigt die geringsten Abweichungen von Soll- zu Ist-Kantenposition unter den neuen Verfahren. Das etablierte Grauwertverfahren ist etwa gleich

gut, unter bestimmten Bedingungen sogar besser. Die Abweichungen über alle verglichenen Verfahren haben Spannweiten im Bereich von $\pm 0,02$ bis $\pm 0,04$ Pixel. Die synthetischen Bilder weisen in allen Kanälen einen guten Kantenkontrast auf. Obwohl die neuen Algorithmen keinen Vorteil durch Nutzung der zusätzlichen Kanäle bei diesen Versuchen haben, liefern sie – verglichen mit etablierter Grauwertbildverarbeitung – sehr gute Ergebnisse.

Bei Versuchen mit reellen Bildern sind ebenfalls systematische Abweichungen nachweisbar. Sie treten aber weniger deutlich hervor, weil es zusätzliche Einflüsse auf den Bildinhalt gibt. Im Vergleich der neuen Verfahren schneidet wiederum die Approximation mit Gauß-Funktion am besten ab. Es werden bei diesen Versuchen nicht die gefundenen Kantenorte mit Sollpositionen verglichen, sondern der Abstand zweier Kantenorte begutachtet. Die Spannweiten der Abstände bewegen sich dabei im Bereich von $\pm 0,03$ Pixel, bzw. $\pm 0,07$ Pixel bei stärkerem Einfluss der Artefakte. Die Standardabweichungen bleiben auf niedrigem Niveau. Sie betragen bei der Approximation mit Gauß-Funktion ca. $0,015$ Pixel, was bei dem genutzten System etwa $0,1\text{ }\mu\text{m}$ entspricht.

Im direkten Vergleich von zwei verschiedenen Systemen, einem mit einem panchromatischen Ein-Kanal-Sensor und einem mit einem CFA-Sensor, zeigt das CFA-System geringere Abweichungen. Mit beiden Systemen ist es möglich, eine Struktur zu messen, die $0,2$ Pixel, respektive $1,3\text{ }\mu\text{m}$ große Formfehler hat. Bei den zufälligen Fehlern zeigt das CFA-System mit den neuen Algorithmen gegenüber dem panchromatischen System mit den etablierten Verfahren Vorteile. Die Standardabweichungen der gemessenen Abstände sind geringer: $0,014$ zu $0,025$ Pixel bzw. 90 nm zu 160 nm .

Unter guten Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass mit einer Bayer-Pattern-CFA-Kamera mit angepasster Beleuchtung und den neuen Algorithmen Abweichungen bei der Kantenortsbestimmung zu erwarten sind, die unter einem $1/20$ Pixel liegen. Der Hauptvorteil gegenüber herkömmlicher Grauwertbildverarbeitung sind dabei nicht die marginal kleineren Abweichungen, sondern die besseren Chancen, einen ausreichenden Kontrast an der Kante zur Verfügung zu haben. Mit der neuen Mehrkanalbildverarbeitung können in Standardsituationen ohne Nachteile geometrische Größen an Messobjekten bestimmt werden. Bei besonderen Messaufgaben, bei denen die etablierte Grauwertbildverarbeitung versagt, werden mit Hilfe der neuen Verfahren Bauteile erfolgreich gemessen bzw. genauere Ergebnisse erreicht werden können.

5.2 Ausblick

Für zukünftige Arbeiten sind verschiedene Verbesserungen und Variationen der erarbeiteten Verfahren denkbar.

Damit der neue Differenzvektor-Kantenfilter kompatibel zu vorhandenen Grauwertbildverarbeitungs-Architekturen ist, mussten einige Nachteile in Kauf genommen werden.

- Die Ergebnisse, die Kantengrauwerte, sind mit reduzierter Präzision von 8 bit abgespeichert.
- Die Filterung des gesamten Bildes erfordert viele Rechenoperationen, obwohl später für die Messung nur ein Teil der Pixel für Kantenortsbestimmung genutzt wird (Messfeld, Suchstrahlen).

Bei den experimentellen Versuchen hat sich darüber hinaus gezeigt, dass die Berechnung der Suchstrahlgrauwerte ein Schwingungsverhalten bei kleinen Winkeln verursachen kann und dass bei diesen Berechnungen numerische Fehler durch die geringe Präzision von 8 bit entstehen.

Ein möglicher Weg, diese Abweichungen zu verringern, wäre, den Differenzvektorfilter mit der Suchstrahlberechnung zu kombinieren. Das ist auch deshalb sinnvoll, weil beide Verfahren auf 2×2 großen Pixelnachbarschaften basieren und es wären nur einfache Anpassungen der Formeln nötig. Die gesamte Berechnung könnte mit hoher Präzision durchgeführt werden. Zusätzlich ist denkbar, das Ergebnis auch mit hoher Präzision an die anschließende Kantenortsbestimmung zu übergeben. Dafür wären aber deutlich aufwändigere Änderungen an diesen Algorithmen nötig.

Im Kapitel zum Stand der Technik wurden Abweichungen durch wellenlängenabhängige Verzeichnungen (Farbquerfehler) diskutiert. Es gibt in der vorliegenden Arbeit noch keine Ansätze zur Kompensation dieser Abweichungen. Das Konzept der nachträglichen Koordinatenkorrektur, wie es üblicherweise für die Messung geometrischer Größen angewandt wird, ist für die Mehrkanalbildverarbeitung nicht anwendbar. Die kanalweise Korrektur auf Grundlage der Grauwertbilder der Einzelkanäle ist denkbar für Bilder, die von Kameras mit CFA stammen, aber nicht optimal. Eine geeignete Stelle in der Kette der Bildverarbeitungsalgorithmen zur Kompensation der Verzeichnung ist das Demosaiking. Hier wird aus den Rohdaten des Sensors das vollständige Mehrkanalbild berechnet.

Das vorgestellte Konzept des Demosaikings eignet sich gut, um die Korrektur der Verzeichnung zu integrieren. Statt der festen Gewichtungstabelle könnte eine 2D-Gewichtungsfunktion genutzt werden. Die Pixelmittelpunkte der berücksichtigten Pixel würden entsprechend der Korrekturdaten von ihren ursprünglichen Positionen „verschoben“ werden. Dieses Vorgehen hätte neben der Verringerung der Geometrieabweichung einen weiteren Vorteil: Das Bild hätte auch für den

Betrachter eine höhere Qualität, da der Effekt von farbigen Kanten an sehr scharfen Strukturübergängen verringert würde.

Eine nötige Voraussetzung zur Umsetzung jeder Art von Mehrkanal-Verzeichnungskorrektur ist ein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Verzeichnungen. Konzepte, die für monochromatische Systeme genutzt werden, können darauf übertragen werden. Es wird aber einiger Anpassung an die Besonderheiten der Mehrkanalbildverarbeitung bedürfen.

Literaturverzeichnis

- [Bau07] BAUER, Norbert: *Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung*. Stuttgart : Fraunhofer Irb Verlag, 2007
- [Bay75] BAYER, B. E.: *Color Imaging Array*. 1975. – Schutzrecht: US 3,971,065
- [BB06] BURGER, Wilhelm ; BURGE, Mark: *Digitale Bildverarbeitung: Eine Einführung mit Java und ImageJ*. Berlin : Springer, 2006
- [Bon10] BONDAREW, Olga: *Untersuchungen zur subpixelgenauen Kantenortsbestimmung in gefilterten Farbbildern*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2010
- [BSMM08] BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDJAJEW, K. A. ; MUSIOL, Gerhard ; MUEHLIG, Heiner: *Taschenbuch der Mathematik*. 7., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Frankfurt am Main : Harri Deutsch, 2008. – ISBN 3817120079
- [BT09] BUI, Alex A. T. ; TAIRA, Ricky K.: *Medical Imaging Informatics*. Springer-Verlag Gmbh, 2009
- [Cof08] COFFIN, Dave: *Raw photo decoder "dcraw" v8.88*. <http://www.cybercom.net/~dcoffin/dcraw/>. Version: 2008
- [CR85] CHRISTOPH, R. ; REINSCH, A.: *Untersuchungen zu einem Verfahren zur Präzisionslageerkennung optisch wirksamer Strukturen mit Hilfe einer mikrorechnergesteuerten CCD-Zeile*, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Diss., 1985
- [DIN94] DIN E. V. (Hrsg.): *Internationales Wörterbuch der Metrologie*. Berlin : Beuth, 1994. – ISBN 3410130861
- [Ele09] ELECTRONIC IMAGING EUROPE GMBH FUJIFILM: *Fujifilm Digital, Foto-Lexikon, Super CCD*. <http://finepix.de/cms/home/myfinepix/foto-wissen/foto-lexikon/glossareintrag/glossary-detail/super-ccd/>. Version: 2009

- [EMNW05] ENGELN-MÜLLGES, Gisela ; NIEDERDRENK, Klaus ; WODICKA, Reinhard: *Numerik-Algorithmen : Verfahren, Beispiele, Anwendungen*. 9., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Berlin : Springer, 2005 (Xpert.press). – ISBN 3540626697
- [Ern91] ERNST, Hartmut: *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*. München : Franzis, 1991
- [FB90] FORGBER, E. ; BESSLICH, Ph.W.: Zur Strategie der Kantenerkennung in Grauwertbildern. In: *Bild und Ton* 43 (1990), Nr. 8/9, S. 260–264
- [GW07] GONZALEZ, Rafael C. ; WOODS, Richard E.: *Digital Image Processing*. 3. Aufl. New Jersey : Prentice Hall International, 2007. – ISBN 0131687286
- [Haf01] HAFERKORN, Heinz: *Bewertung optischer Systeme*. Weinheim : Wiley-VCH, 2001. – ISBN 3527402780
- [Hau91] HAUPTMANN, Peter: *Sensoren : Prinzipien und Anwendungen*. München : Hanser, 1991. – ISBN 3446160736
- [Hec05] HECHT, Eugene: *Optik*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005. – ISBN 3486273590
- [Hen02] HENTSCHEL, H.-J.: *Licht und Beleuchtung*. Heidelberg : Huethig GmbH, 2002
- [HP05] HIRAKAWA, Keigo ; PARKS, Thomas. W.: Adaptive Homogeneity-Directed Demosaicing Algorithm. In: *IEEE Transactions On Image Processing* Bd. 14, 2005, S. 360–369
- [Ind09] INDUSTRIAL METROLOGY ZEISS: *Zeiss Industrial Metrology, Products, METROTOM 1500*.
<http://www.zeiss.com/4125682000247242/ContentsWWWIntern/3C74C1CBE0346213862575DD0055C5C6>. Version: 2009
- [Jae09] JAEHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin : Springer, 2009
- [Küh97] KÜHN, Olaf: *Ein Beitrag zur hochauflösenden zweidimensionalen Geometriemessung mit CCD-Zeilensensoren*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 1997
- [Kle05] KLEIN, Georg A.: *Farbenphysik für industrielle Anwendungen*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2005. – ISBN 3540406123
- [Kod09] KODAK COMPANY EASTMAN: *Kodak Image Sensor Solution, Press Release, KODAK TRUESENSE*.
<http://www.kodak.com/global/en/business/ISS/News/pressReleases/archive/2009/pr5.jhtml?pq-path=15380/15725>. Version: 2009

- [KZ92] KLETTE, Reinhard ; ZAMPERONI, Piero: *Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung*. Braunschweig : Verlag Vieweg, 1992. – ISBN 3528164315
- [LBN88] LINSS, G. ; BRÜCKNER, P. ; NOPPER, C.-B.: CCD-Liniensensoren zur berührungslosen Längenmessung. In: *messen steuern regeln* 31 (1988), Nr. 8, S. 360–364
- [Lee08] LEE, Yun-Shik: *Principles of Terahertz Science and Technology*. New York : Springer-Verlag GmbH, 2008
- [Lin05] LINSS, Gerhard: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. Braunschweig : Hanser Fachbuchverlag, 2005. – ISBN 3446228217
- [Lin08] LINSS, Gerhard (Hrsg.): *Quick Image Development Handbuch*. Ilmenau : STZ Qualitätssicherung und Bildverarbeitung, 2008
- [LLT97] LIPSON, Stephen G. ; LIPSON, Henry S. ; TANNHAUSER, David S.: *Optik*. Berlin : Springer, 1997. – ISBN 3540619127
- [LOT09] LOT-ORIEL GMBH & CO. KG: <http://www.lot-oriel.com>, *Optische Filter*. http://www.lot-oriel.com/site/site_down/of_dcfilters_deeno1.pdf. Version: 2009
- [Mer99] MERRILL, R. B.: *Color Separation in an Active Pixel Cell Imaging Array Using a Triple-Well-Structure*. 1999. – Schutzrecht: US 5,965,875
- [Mit09a] MITUTOYO DEUTSCHLAND GMBH: *Mitutoyo Deutschland, Bildverarbeitungsgeräte*. <http://www2.mitutoyo.de/de/bildverarbeitungsmessgeraete/produkte/quick-vision/qv-hyper/index.html>. Version: 2009
- [Mit09b] MITUTOYO EUROPE GMBH: <http://www.mitutoyo.de>, *Produkt Lounge, Bildverarbeitungsgeräte, Quick Vision Hybrid*. <http://www2.mitutoyo.de/de/bildverarbeitungsmessgeraete/produkte/quick-vision-hybrid-kopie-1/index.html>. Version: 2009
- [Neh01] NEHSE, Uwe: *Beleuchtungs- und Fokusregelungen für die objektivierte optische Präzisionsantastung in der Koordinatenmesstechnik*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2001
- [Neu02] NEUNDORF, Werner: *Numerische Mathematik : Vorlesungen, Übungen, Algorithmen und Programme*. Aachen : Shaker, 2002 (Berichte aus der Mathematik). – ISBN 3832210016
- [Neu05] NEUMANN, Hans-Joachim: *Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten*. Renningen : Expert-Verlag, 2005

- [NF94] NAMAZI, Nader M. ; FAN, C. M.: A new iterative algorithm for image restoration based on maximum likelihood principle. In: *International Journal of Modeling and Simulation* 14 (1994), Nr. 1
- [NL01] NIEBUHR, Johannes ; LINDNER, Gerhard: *Physikalische Meßtechnik mit Sensoren*. München : Oldenbourg Wissensch.Vlg, 2001
- [OGP09a] OGP MESSTECHNIK GMBH: <http://www.ogpmesstechnik.de>, Modelle. http://www.ogpmesstechnik.de/pdf/mod/025_Vantage_650.pdf. Version: 2009
- [OGP09b] OGP MESSTECHNIK GMBH: *OGP, Messtechnik GmbH, Modelle*. <http://www.ogpmesstechnik.de/framesetmod.html>. Version: 2009
- [OKM09] OKM JENA MAHR: *Mahr OKM Jena, Produkte, Optisches Koordinatenmessgerät UNI-VIS 250*. <http://www.okm-jena.de/index.php?NodeID=11136>. Version: 2009
- [OSR09] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *Osram Semiconductors, products, LED, Advanced Power TOPLED*. <http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?fav0id=oooooooooooo3df2104ed0023&act=showBookmark>. Version: 2009
- [Pfe92] PFEIFER, Tilo (Hrsg.): *Koordinatenmesstechnik für die Qualitätssicherung*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1992. – ISBN 3184012123
- [Pla04] PLATO, Robert: *Numerische Mathematik kompakt : Grundlagenwissen für Studium und Praxis; [mit Online-Service zum Buch]*. 2., überarb. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2004. – ISBN 3528131535
- [PP02] PROFOS, Paul ; PFEIFER, Tilo: *Handbuch der industriellen Meßtechnik*. München : R. Oldenbourg Verlag, 2002
- [Rot90] ROTHE, O.: *Bewertung von CCD-Sensoren mit Methoden der Bildverarbeitung*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 1990
- [RV08] RÜCKERT, Ingo ; VIETZE, Oliver: *Bildverarbeitungsvorrichtung für Farbbilddaten und Verfahren zur Bildverarbeitung von Farbbilddaten*. 2008. – Schutzrecht: WO002008019867A2
- [Sch07a] SCHANDA, Janos: *Colorimetry: understanding the CIE system*. 1. Aufl. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. – ISBN 0470049049
- [Sch07b] SCHNEE, Jost: *Untersuchung von Algorithmen zur Kantenortbestimmung für die hochauflösende Messung mit Farbkameras*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2007
- [Sch08] SCHUMANN, Maik: *Untersuchungen von neuartigen numerischen Korrekturverfahren für die geometrische Verzeichnung von Bildern*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2008

- [Sch09] SCHOTT AG: *Schott, Products, Machine vision, ColdVision Series*. <http://www.schott.com/lightingimaging/english/machinevision/coldvision/index.html>. Version: 2009
- [Smi91] SMIRNOW, Viktor: *Untersuchungen zur rechnergestützten berührungslosen Prüfung von Führungsachsen für Minifolienspeicher unter Verwendung von CCD-Zeilen und Personalcomputer-Instrumenten*, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Diss., 1991
- [Son03] SONY: *Sony Press Release*. http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press_Archive/200307/03-029E/. Version: 2003
- [Son09] SONY CORPORATION: *Sony SC HP, Products, Image Sensors, Progressive Scan System CCD*. http://www.sony.net/Products/SC-HP/pro/image_senser/progressive_scan.html. Version: 2009
- [ST08] SALEH, Bahaa E. A. ; TEICH, Malvin C.: *Grundlagen der Photonik*. 1. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 2008. – ISBN 3527406778
- [Ste09] STEINBEIS TRANSFERZENTRUM QUALITÄTSSICHERUNG UND BILDVERARBEITUNG: *STZ Qualitätssicherung und Bildverarbeitung, Produkte, QI Development*. <http://www.stz-ilmenau.de/products/index.php?group=7#7>. Version: 2009
- [Str05] STRUTZ, Tilo: *Bilddatenkompression. Grundlagen, Codierung, Wavelets, JPEG, MPEG, H.264*. 3. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2005. – ISBN 3528239220
- [Thu09] THUSELT, Frank: *Physik der Halbleiterbauelemente*. Berlin : Springer, 2009
- [Tön05] TÖNNIES, Klaus D.: *Grundlagen der Bildverarbeitung*. München : Pearson Studium, 2005. – ISBN 3827371554
- [Töp08] TÖPFER, Susanne: *Automatisierte Antastung für die hochauflösende Geometriemessung mit CCD-Bildsensoren*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2008
- [UB00] USBECK, Christian ; BRÜCKNER, Peter: *Verfahren zur Bestimmung der Kantenposition in Farbbildern, insbesondere für Farb- und Intensitätsübergänge*. 2000. – Schutzrecht: DE000010020067A1
- [VDM09] VDMA: *Industrielle Bildverarbeitung / VDMA*. Frankfurt am Main : VDMA Verlag GmbH, 2009. – Forschungsbericht

- [Wei90] WEIGERT, Martin: *Ein Beitrag zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf einen Optimalalgorithmus zur subpixelgenauen Lagebestimmung punktförmiger Objektabbildungen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 1990
- [Wer89] WERNSTEDT, Jürgen: *Experimentelle Prozessanalyse*. Berlin : Verlag Technik Berlin, 1989. – ISBN 3341006761
- [Wer08] WERNER, Martin: *Information und Codierung: Grundlagen und Anwendungen*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2008. – ISBN 3834802328
- [Wer09a] WERTH MESSTECHNIK GMBH: *Werth, Messtechnik GmbH, Produkte, ViedoCheck*. <http://www.werth.de/index.php?id=131&menuitems=66,108,69,70,23>. Version: 2009
- [Wer09b] WERTH MESSTECHNIK GMBH: *Werth TomoSope HV 500*. <http://www.werth.de/de/unser-angebot/produkte-nach-kategorie/koordinatenmessgeraete/fuer-computertomografie/werth-tomosope-hv-500.html>. Version: 2009
- [WRC84] WOSCHNI, G. ; REINSCH, A. ; CHRISTOPH, R.: Verfahren zur lagebestimmung einer optischen wirksamen Struktur mit einer CCD-Zeile. In: *Feingerätetechnik* 33 (1984), Nr. 5, S. 219–221
- [You97] YOUNG, Matt: *Optik, Laser, Wellenleiter*. Berlin : Springer, 1997. – ISBN 3540603581
- [Zei09] ZEISS: *www.zeiss.com, Industrial Metrology, Products*. http://www.zeiss.com/C1256CF5004Co746/Order/?OpenForm&en_o-inspect. Version: 2009

Abkürzungen

AHD	Adaptive Homogeneity Direction	NIR	nahes Infrarot Spektralbereich längerer Wellenlängen, der sich direkt an VIS anschließt
CCD	Charge-coupled Device		
CFA	Color Filter Array	OLED	organische Leuchtdiode <i>engl.</i> organic led
CHA	Circular Homogeneity Approximation	PSF	Point Spread Function
CIE	Commission internationale de l'éclairage	QID	Quick Image Development Für Implementierung genutzte Softwarebibliothek
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	RGB	Farbraum mit den Grundfarben Rot, Grün und Blau
DLL	Dynamic Link Library	SK	Schräge Kante
EM	elektromagnetischer Spektralbereich	SNR	Signal-Rausch-Verhältnis <i>engl.</i> Signal-to-noise ratio
IR	Infrarot Spektralbereich längerer Wellenlängen, der sich direkt an NIR anschließt	UV	Ultraviolett Spektralbereich kürzerer Wellenlängen, an den sich direkt VIS anschließt
HSI	Hue Saturation Intensity Häufig genutzter Farbraum (Farbton, Farbsättigung, Intensität)	VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
JPEG	Joint Photographic Experts Group	VEB	Volkseigener Betrieb
KMG	Koordinatenmessgerät	VIS	für den Menschen sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums
KOK	Kantenortskriterium	VK	Vertikale Kante
LCD	Liquid Crystal Display	WKS	Werkstückkoordinatensystem
LED	Leuchtdiode <i>engl.</i> light emitting diode		

